Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LIII, вып. 1, 1966 г.

УДК 621.34:621.876

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА ДЛЯ ПРИВОДА РУДНИЧНОГО ПОДЪЕМА

Е. М. Проскуряков

Энергетические показатели — коэффициент полезного действия (к. п. д.) и коэффициент мощности ($\cos\varphi$) — в значительной мере определяют выбор той или иной системы регулируемого электропривода.

К. п. д. каскада можно определить через потери мощности в каскаде $\Sigma p_к$

$$\eta_к = 1 - \frac{\sum p_к}{P_2 + \sum p_к}, \tag{1}$$

где P_2 — мощность на валу двигателя.

Потери мощности в каскаде складываются из потерь в асинхронном двигателе $p_д$, сетевом трансформаторе инвертора $p_{т.с}$ и выпрямителе $p_в$

$$\sum p_к = p_д + p_{т.с} + p_в. \tag{2}$$

Потери мощности в двигателе определяются, согласно общей теории электрических машин [Андреев, Сабинин, 1963],

$$p_д = P_{2н} \frac{1-\eta}{\eta} \cdot \frac{\alpha_д + \xi}{\alpha_д + 1}, \tag{3}$$

где $P_{2н}$ — номинальная мощность двигателя; η — к. п. д. двигателя при номинальной нагрузке; ξ — коэффициент загрузки асинхронного двигателя по току; $\alpha_д$ — коэффициент потерь, определяемый отношением постоянных потерь $p_{д\,с}$ к переменным $p_{д\,v}$ при номинальной нагрузке,

$$\alpha_д = \frac{p_{д\,с}}{p_{д\,v}}.$$

Переменные потери в двигателе при номинальной нагрузке

$$p_{д\,v\,н} = 3\left(I'_{2н}\right) r'_2 \left(1 + \frac{r_1}{r'_2}\right) = \frac{P_{2н}}{\eta_{мех}} \cdot \frac{s_н}{1 - s_н}\left(1 + \frac{r_1}{r'_2}\right), \tag{4}$$

где $\eta_{мех}$ — механический к. п. д. двигателя, $\eta_{мех} = 0{,}97—0{,}98$; $I_{2н}$ — приведенный ток ротора; r_1, r'_2 — сопротивление обмоток двигателя; $s_н$ — номинальное скольжение двигателя.

Для средних и крупных машин с достаточной степенью точности можно принять $\frac{r_1}{r_2'} = 1$. При этом постоянные потери мощности двигателя

$$p_{д.с} = \frac{P_{2н}}{\eta_{мех}} \left[(1-\eta) \frac{\eta_{мех}}{\eta} - \frac{2s_н}{1-s_н} \right] \tag{5}$$

Из формул (4) и (5) можно определить коэффициент потерь двигателя по паспортным данным.

Потери мощности в сетевом трансформаторе

$$p_{т.с} = p_{0т.с} + p_{м.т.с} = p_{м.н.т.с} (\xi^2 + \alpha_т), \tag{6}$$

где $\alpha_т$ — коэффициент потерь сетевого трансформатора, по каталожным данным мощности холостого хода $p_{0\,т.с}$ и номинальным нагрузочным потерям $p_{м\,н.т.с}$.

Потери мощности в выпрямителе

$$p_в = \xi \Delta u_в I_{d\,н} + k P_{инв.н} = P_{инв.н} (\xi \Delta u_в' + k), \tag{7}$$

где $p_{инв.н}$ — номинальная мощность инвертора; $\Delta u_в$ — падение напряжения в вентилях выпрямителя и инвертора; $\Delta u_в'$ — падение напряжения в вентилях в долях от номинального напряжения инвертора; $I_{d\,н}$ — номинальное значение выпрямленного тока; k — отношение потерь мощности во вспомогательных устройствах выпрямителя (цепях накала и зажигания вентилей, сглаживающем дросселе, цепях сеточного управления и др.) к номинальной мощности инвертора.

Для ртутных выпрямителей [Каганов, 1956] $k = 0{,}005 \div 0{,}01$, для полупроводниковых вентилей можно принять $k = 0$. Мощность на валу асинхронного двигателя P_2 выразим через скольжение

$$P_2 = P_{2н} \mu \frac{1-s}{1-s_н}, \tag{8}$$

μ — относительное значение момента двигателя,

$$\mu = \frac{M}{M_н}.$$

Потери в двигателе, сетевом трансформаторе и выпрямителе удобно выразить относительно номинальной мощности двигателя

$$p_д' = \frac{p_д}{P_{2н}} = \frac{1-\eta}{\eta} \cdot \frac{\alpha_д + \xi^2}{\alpha_д + 1};$$

$$p_{т.с} = \frac{p}{P_{2н}} (\xi^2 + \alpha_т); \quad p_в = \frac{P_{инв.н}}{P_{2н}} (\xi \Delta u + k). \tag{9}$$

Выражение для к. п. д. каскада, с учетом формул (1), (2), (8), (9), примет вид

$$\eta_к = 1 - \frac{p_д' + p_{т.с}' + p_в}{\mu \frac{1-s}{1-s_н} + p_д' + p_{т.с}' + p_в'} \tag{10}$$

Для построения зависимости $\eta_к = f(\mu)$ необходимо найти соотношение между μ и $\xi = \frac{I_2'}{I_{2н}'}$ в схеме каскада. Относительное значение момента выразим через электромагнитную мощность двигателя

$$\mu = \frac{P_{эм}}{P_{эм.н}}.$$

Электромагнитная мощность двигателя в схеме каскада [Каганов, 1956]

$$P_{эм} = E_{d\,p\,0} I_d \left(1 - \frac{I_d X_p}{\sqrt{6}\, E_2}\right),$$

где $E_{d\,p\,0}$ — выпрямленная э. д. с. неподвижного ротора,

$$E_{d\,p\,0} = \frac{\sqrt{6} \cdot 3}{\pi} E_2,$$

X_p — приведенное к ротору индуктивное сопротивление фазы двигателя.

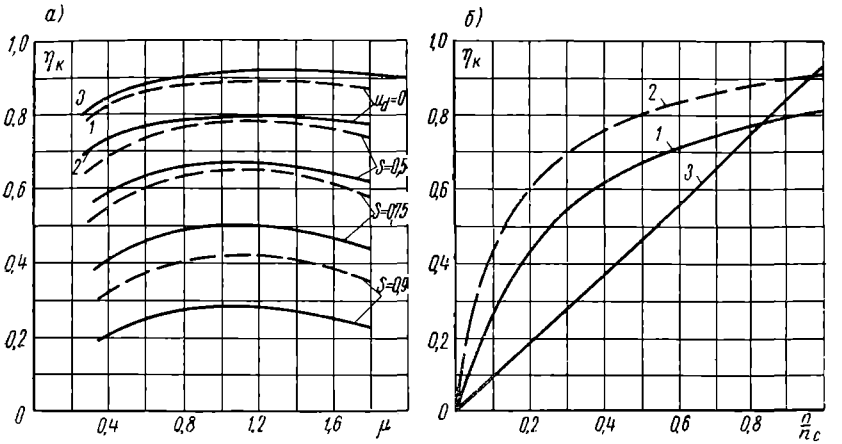


Рис. 1. К. п. д. каскада: *а* — при различных скольжениях двигателя в зависимости от момента μ на валу двигателя; *б* — в зависимости от относительной скорости вращения $\frac{n}{n_c}$ двигателя при μ = 1:

1 — каскада с ртутными вентилями; *2* — каскада с полупроводниковыми вентилями; *3* — асинхронного двигателя.

Учитывая, что $I'_2 = I_d \frac{\sqrt{6}}{\pi}$, имеем

$$\mu = \xi \left[\frac{1 - \frac{\pi}{6k_I} \xi}{1 - \frac{\pi}{6k_I}} \right], \qquad (11)$$

где $k_I = \frac{E_2}{X_p I'_{2н}}$ — кратность пускового тока ротора.

На рис. 1, *а* к. п. д. вычислен для каскада, состоящего из асинхронного двигателя типа АК-12-52-8 ($P_{2н}$ = 320 *квт*), сетевого трансформатора ТМРУ-600/10 ($s_н$ = 343 *ква*) с преобразователем из ртутных вентилей РМВ типа 250 × 6 (кривая *1*) и из полупроводниковых вентилей ВК и ВКДУ (кривая *2*). Для сравнения приведена зависимость $\eta = f(\mu)$ при закороченной обмотке ротора (кривая *3*).

На рис. 1, *б* показана зависимость к. п. д. каскада от скорости двигателя при номинальной нагрузке на его валу, а также зависимость $\eta = f\left(\frac{n}{n_c}\right)$ при регулировании скорости двигателя включением сопротивления в цепь ротора.

При полной скорости двигателя (u_d = 0) к. п. д. каскада с полупроводниковыми вентилями на 2—2,5% ниже к. п. д. асинхронного

двигателя. С учетом мощности, потребляемой магнитной станцией асинхронного привода (1,5 ÷ 7,5 *квт*) [Живов, 1964], можно считать, что к. п. д. каскада с полупроводниковыми вентилями при полной скорости не ниже к. п. д. асинхронного двигателя. В каскаде с ртутными вентилями к. п. д. понижается примерно на 10% за счет потерь мощности в дуге ртутных вентилей. Поэтому в каскаде с преобразователем из ртутных вентилей обмотку ротора двигателя следует закорачивать на период равномерного хода подъемной машины. При работе двигателя на пониженных скоростях и в период разгона к. п. д. каскада выше к. п. д. двигателя, регулируемого реостатом в цепи ротора. В период торможения двигателя в схеме каскада, в отличие от всех других способов торможения асинхронного двигателя, кинетическая энергия движущихся масс за вычетом потерь возвращается в сеть.

К. п. д. подъемной установки за цикл подъема можно определить по расходу энергии и потерям для каждого периода тахограммы подъема t_k.

Расход энергии за цикл подъема асинхронным приводом при регулировании скорости реостатом в цепи ротора и постоянных статических усилиях на ободе барабана

$$A_{\text{ц}} = \sum_{1}^{m} P_{\text{ср}.k} t_k = \frac{F_{\text{уст}} T v_{\text{с}}}{\eta_{\text{пред}}} = \frac{k Q_{\text{гр}} v_{\text{с}} T}{\eta_{\text{пред}}}, \tag{12}$$

где $P_{\text{ср}.k}$ — средняя мощность, потребляемая в течение периода; $v_{\text{с}}$ — скорость на ободе барабана, соответствующая синхронной скорости двигателя; $F_{\text{уст}}$ — усилие на ободе барабана при равномерной скорости:

$$F = kQ_{\text{гр}}$$

$\eta_{\text{пред}}$ — к. п. д. редуктора; T — продолжительность цикла; m — число периодов тахограммы; Q — вес груза.

Для асинхронного вентильного каскада затраты энергии на цикл будут меньше на величину энергии, возвращенной каскадом в сеть,

$$A_{\text{рек}} = \sum_{1}^{m} P_{k\,\text{рек}} t_k = \sum_{1}^{m} \left[\frac{F_{\text{ср}}}{\eta_{\text{пред}}} (v_{\text{рек}} - v_{\text{ср}}) - p_{\text{к}} \right] t_k, \tag{13}$$

где $F_{\text{ср}}$ и $v_{\text{ср}}$ — средние усилие и скорость за период; p_k — потери в каскаде; $v_{\text{рек}}$ — скорость, соответствующая скольжению $s_{\text{рек}}$, при котором энергия скольжения начинает возвращаться в сеть.

Величина $s_{\text{рек}}$ определяется из уравнения равновесия э. д. с. в цепи выпрямленного тока, когда противо-э. д с. инвертора равна 0 ($\beta_{\text{и}} = 90\%$) [Бутаев, Эттингер, 1951]

$$s_{\text{рек}} = \frac{\Delta u_{\text{в}} + I_{d\,\text{уст}} \left(\frac{3}{4\pi} X_{\text{т}} + 2R_2 + \frac{R_{\text{т}}}{2} \right)}{E_{d\,\text{р}\,0} - I_{d\,\text{уст}} \left(\frac{3}{\pi} X_{\text{р}} + 2R_1' \right)}, \tag{14}$$

где $\Delta u_{\text{в}}$ — падение напряжения в вентилях; $I_{d\,\text{уст}}$ — выпрямленный ток, соответствующий моменту двигателя при равномерной скорости; R_1', R_2, $X_{\text{р}}$ — приведенные к обмотке ротора сопротивления фазы двигателя; $R_{\text{т}}$, $X_{\text{т}}$ — приведенные ко вторичной обмотке сопротивления фазы трансформатора.

К. п. д. установки за цикл подъема с приводом от асинхронного вентильного каскада будет выше при условии

$$\sum_{1}^{m} \frac{F_{\text{ср}}}{\eta_{\text{пред}}} (v_{\text{рек}} - v_{\text{ср}}) t_k > \sum_{1}^{m} p_{\text{к}} t_k. \tag{15}$$

Коэффициент мощности асинхронного вентильного каскада при регулировании скорости двигателя снижается вследствие: 1) уменьшения коэффициента мощности самого асинхронного двигателя из-за отставания тока ротора от напряжения на угол, равный половине угла коммутации $\gamma/2$ вентилей ротора; 2) потребления реактивной мощности сетевым трансформатором инвертора; 3) появления высших гармонических в токе ротора и трансформатора.

Коэффициент мощности каскада

$$\chi = k_{\Phi} \frac{P_{\text{к}}}{\sqrt{P_{\text{к}}^2 + Q_{\text{к}}^2}}, \tag{16}$$

где $P_{\text{к}}$ — активная мощность, потребляемая каскадом из сети; $Q_{\text{к}}$ — реактивная мощность каскада; k_{Φ} — коэффициент формы тока; при трапецоидальной форме тока $k_{\Phi} = {}^3/_{\pi}$.

Активная мощность, потребляемая каскадом из сети, может быть выражена через мощность на валу двигателя и к. п. д. каскада

$$P_{\text{к}} = \frac{P_{2\text{н}}}{\eta_{\text{к}}} \mu \frac{1-s}{1-s_{\text{н}}}. \tag{17}$$

Реактивная мощность каскада равна сумме реактивных мощностей двигателя и сетевого трансформатора инвертора

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{д}} + Q_{\text{т.с}}.$$

При этом

$$Q_{\text{д}} = \frac{P_{2\text{н}}}{\eta} \operatorname{tg} \varphi_{\text{д}}, \tag{18}$$

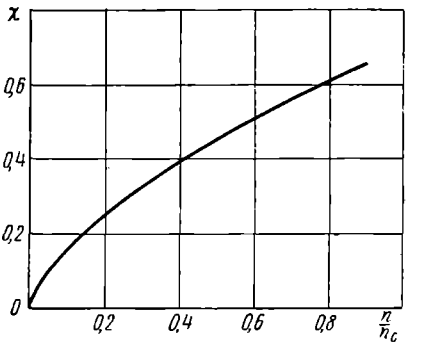


Рис. 2. Коэффициент мощности каскада χ в зависимости от относительной скорости вращения двигателя при $\mu = 1$.

где $\varphi_{\text{д}}$ — угол сдвига фаз первичного тока и напряжения двигателя в схеме каскада [Бутаев, Эттингер, 1951], $\varphi_{\text{д}} = \text{arc cos} \left[\cos \varphi \cos \frac{\gamma}{2}\right]$ $\cos \varphi$ — коэффициент мощности асинхронного двигателя, γ — угол коммутации роторных вентилей.

$$Q_{\text{т.с}} = P_{\text{т.с}} \operatorname{tg} \left(\beta_{\text{и}} - \frac{\gamma_{\text{т}}}{2}\right), \tag{19}$$

где $P_{\text{т.с}}$ — мощность сетевого трансформатора, равная мощности скольжения асинхронного двигателя; $\beta_{\text{и}}$ — угол опережения зажигания инвертора; $\gamma_{\text{т}}$ — угол коммутации сетевого трансформатора.

При постоянном моменте на валу двигателя активная мощность, потребляемая каскадом из сети $P_{\text{к}}$, уменьшается с увеличением скольжения. Реактивная мощность двигателя $Q_{\text{д}}$ при этом остается практически постоянной. Реактивная мощность трансформатора при увеличении скольжения, т. е. уменьшении угла $\beta_{\text{и}}$, уменьшается незначительно, так как пропорционально скольжению увеличивается активная мощность трансформатора $P_{\text{т.с}}$. Поэтому при увеличении скольжения двигателя до единицы $\cos \varphi$ каскада уменьшается до нуля (без учета потерь мощности в каскаде).

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента мощности каскада, данные которого приведены выше, от скорости двигателя при номинальном моменте на валу двигателя. Средневзвешенный коэффициент мощ-

ности каскада можно определить по расходу активной и реактивной мощности для различных периодов тахограммы подъема.

Коэффициент мощности каскада при пониженной скорости значительно ниже cos φ асинхронного двигателя, что существенно снижает качество асинхронного вентильного каскада. Компенсировать реактивную мощность каскада можно с помощью синхронных двигателей, работающих на шахте, или статических конденсаторов. Если такая компенсация недостаточна, то улучшить cos φ каскада можно искусственной коммутацией вентилей инвертора [Чиженко, Выдолоб, 1962]. В этом случае инвертор может работать при опережающем токе, т. е. полностью компенсировать реактивную мощность каскада или обеспечить генерирование реактивной мощности в сеть. Искусственная коммутация несколько усложняет схему и удорожает установку, но увеличивает жесткость механических характеристик каскада и может снизить установленную мощность сетевого трансформатора.

Выводы

1. Привод рудничного подъема от асинхронного вентильного каскада имеет более высокий к. п. д., чем асинхронный привод при регулировании скорости реостатом в цепи ротора.

2. Асинхронный вентильный каскад имеет более низкий коэффициент мощности, чем асинхронный двигатель. Вопрос улучшения коэффициента мощности каскада должен рассматриваться отдельно в каждом конкретном случае с точки зрения обеспечения необходимого значения общешахтного коэффициента мощности.

ЛИТЕРАТУРА

Андреев В. П. Сабинин Ю. А. Основы электропривода. Госэнергоиздат, 1963.

Бутаев Ф. И. Эттингер Е. Л. Вентильный электропривод. Госэнергоиздат, 1951.

Жилов Л. Г. Привод и автоматика подъемных машин. Машиностроение, 1964.

Каганов И. Л. Электронные и ионные преобразователи. Ч. III. Госэнергоиздат, 1956.

Чиженко К. М., Выдолоб Ю. Ф. Вентильный каскад с компенсационным инвертором. Тр. Киевского политехн. ин-та, т. XXXIX, 1962.