

СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Порівняльний аналіз енергетичних показників нерегульованих і частотнокерованих синхронних двигунів показав, що використання частотнокерованих двигунів у приводах зі змінним навантаженням на валу дозволяє істотно підвищити енергетичну ефективність асинхронних двигунів, як основних споживачів електроенергії на власні потреби електростанцій

Сравнительный анализ энергетических показателей нерегулируемых и частотноуправляемых асинхронных двигателей показал, что использование частотноуправляемых двигателей в приводах с переменной нагрузкой на валу позволяет существенно повысить энергетическую эффективность асинхронных двигателей, как основных потребителей электроэнергии на собственные нужды электростанций

Основными потребителями электроэнергии на собственные нужды электростанций являются асинхронные двигатели, используемые для привода вентиляторов, насосов холодной и горячей воды. Характерной особенностью их работы является неравномерность нагрузки, что обусловлено технологическими причинами производства электрической энергии на электрической станции. Уменьшение нагрузки от номинальной приводит к ухудшению энергетических показателей асинхронных двигателей: коэффициента полезного действия (КПД) и коэффициента мощности $\cos\phi$. По данным [1] уменьшение нагрузки в 2 раза приводит к снижению КПД на 3-4 % и $\cos\phi$ на 20-22 %; при уменьшении нагрузки в 4 раза снижение составляет 13-16 % и 37-45 % соответственно.

В настоящее время разработан ряд мероприятий по улучшению энергетических показателей асинхронных двигателей при их нагрузках ниже номинальной:

1. Понижение рабочего напряжения двигателей (переключение схемы обмотки статора).
2. Секционирование статорных обмоток двигателей.
3. Ограничение времени работы двигателей на холостом ходу с помощью автоматических ограничителей.
4. Замена мало загруженных двигателей двигателями меньшей номинальной мощности.

Однако, наиболее радикальным мероприятием, обеспечивающим улучшение рабочих свойств асинхронных двигателей, работающих при широком изменении нагрузки, является замена нерегулируемых двигателей на частотноуправляемые, питаемые от статических преобразователей частоты. Наиболее эффективна такая замена в приводах с вентиляторной нагрузкой, к которым на тепловых электростанциях относятся центробежные насосы, вентиляторы, воздухоудовки и т.п. Использование приводов на базе частотноуправляемых асинхронных двигателей существенно снижает потребление электроэнергии на собственные нужды, увеличивает срок службы электрооборудования и трубопроводов за счет отсутствия больших пусковых токов и гидравлических ударов. Установлено, что при замене нерегулируемого привода дутьевого вентилятора на частотноуправляемый привод, экономия электроэнергии составляет 50 %, окупаемость – 12 месяцев работы.

В статье предлагается методика расчета энергетических показателей частотноуправляемых асинхронных двигателей.

При вентиляторном характере нагрузки используется квадратичный закон регулирования [2] (регулирование "вниз" от номинальной частоты вращения):

$$U_1/U_{1н} = (f_1/f_{1н})^2, \quad (1)$$

или в относительных единицах: $\gamma = \alpha^2$, где $\gamma = U_1 / U_{1н}$ – относительное напряжение; $\alpha = f_1 / f_{1н}$ – коэффициент регулирования.

Тогда приложенное к двигателю напряжение изменяется в процессе регулирования по закону:

$$U_1 = U_{1н} \cdot \gamma = U_{1н} \cdot \alpha^2. \quad (2)$$

При регулировании по этому закону коэффициент мощности, КПД и перегрузочная способность двигателя остаются постоянными при уменьшении частоты питания вплоть до половины номинальной. Энергетические показатели определяются в ходе расчета рабочих характеристик двигателя. Основные соотношения, необходимые для расчета рабочих характеристик могут быть получены с использованием Т-образной схемы замещения [2], однако, в этом случае не учитывается активное сопротивление ветви намагничивания, т.е. активная составляющая тока холостого хода, эффект вытеснения тока, характеристика намагничивания представляется кусочно-непрерывной. При этом расчетные выражения весьма громоздки, что затрудняет анализ процессов в частотноуправляемом двигателе. Значительно удобнее использовать Г-образную схему замещения с независимыми контурами [3], приведенную на рис. 1.

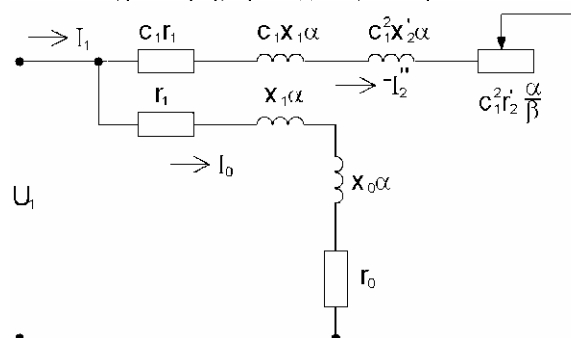


Рис. 1. Г-образная схема замещения частотноуправляемого асинхронного двигателя

С помощью Г-образной схемы замещения определяются токи контуров, потери, энергетические показатели и моменты двигателя. Полное сопротивление рабочего контура:

$$Z_{k\beta} = c_1 \cdot \sqrt{\left(r_1 + c_1 \cdot r_2' \cdot \frac{\alpha}{\beta} \right)^2 + \alpha^2 \cdot \left(x_1 + c_1 \cdot x_2' \right)^2}, \quad (3)$$

где $c_1 = 1 + x_0 / x_1$ – коэффициент коррекции параметров при переходе от Т-образной к Г-образной схеме замещения; x_1 – индуктивное сопротивление обмотки статора при $f_1 = f_{1н}$; x_2' – индуктивное сопротивление обмотки ротора (приведенное) при $f_1 = f_{1н}$; x_0 – главное индуктивное сопротивление двигателя при $f_1 = f_{1н}$;

r_1 – активное сопротивление обмотки статора; r_2' – активное сопротивление обмотки ротора (приведенное); r_0 – фиктивное активное сопротивление, введенное в схему замещения для учета магнитных потерь; $\beta = f_2 / f_{1н}$ – абсолютное скольжение ротора, при этом относительное скольжение $S = \beta / \alpha$.

Здесь и в дальнейшем при каждом значении α задаются рядом значение β в пределах $0 < \beta < \beta_{кр}$, где:

$$\beta_{кр} = \frac{c_1 \cdot r_2'}{\sqrt{\frac{r_1^2}{\alpha^2} + (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2}}. \quad (4)$$

При использовании Г-образной схемы замещения магнитный поток двигателя не зависит от параметров рабочего контура, а определяется только законом изменения частоты и напряжения. При квадратичном законе регулирования $\gamma = \alpha^2$, магнитный поток зависит от частоты питающего напряжения:

$$\Phi = \frac{U_{1н} \cdot \gamma}{4,44 \cdot W_1 \cdot K_{об1} \cdot f_{1н} \cdot \alpha} = \frac{U_{1н} \cdot \alpha}{c \cdot f_{1н}}, \quad (5)$$

где $c = 4,44 \cdot W_1 \cdot K_{об1}$.

При регулировании частоты вращения Ω двигателя "вниз" от номинальной (при $f_1 = f_{1н}$) магнитный поток уменьшается и можно считать магнитную систему ненасыщенной, поэтому реактивная составляющая тока холостого хода прямо пропорциональна магнитному потоку. Из (5) следует:

$$I_{ОР} = I_{ОРН} \cdot \left(\frac{\gamma}{\alpha}\right),$$

где $I_{ОРН}$ – реактивная составляющая тока холостого хода при номинальных напряжении и частоте.

Реактивная и активная составляющие тока статора, определяемые их схемы замещения:

$$\begin{aligned} I_{1P} &= I_{ОР} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2 = \\ &= \gamma \cdot \left[\frac{I_{ОРН}}{\alpha} + \frac{U_{1н}}{Z_{к\beta}^2} \cdot c_1 \cdot \alpha \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2') \right], \quad (6) \end{aligned}$$

где $\sin \varphi_2 = \frac{c_1 \cdot \alpha \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2')}{Z_{к\beta}}$; φ_2 – угол между U_1 и I_2'' .

$$I_{1a} = I_{оа} + I_2'' \cos \varphi_2 = I_{оа} + \frac{U_{1н} \cdot \gamma}{Z_{к\beta}^2} \cdot c_1 \left(r_1 + c_1 \cdot r_2' \cdot \frac{\alpha}{\beta} \right), \quad (7)$$

где $\cos \varphi_2 = \frac{c_1 \cdot \left(r_1 + c_1 \cdot r_2' \cdot \frac{\alpha}{\beta} \right)}{Z_{к\beta}}$.

Активная составляющая тока холостого хода $I_{оа}$ определяется суммой потерь двигателя холостого хода:

$$\sum P_o = P_{эл10} + P_{маг} + P_{мех}, \quad (8)$$

где $P_{эл10}$ – электрические потери в обмотке статора от тока холостого хода ($I_o \approx I_{ор}$); $P_{маг}$ – магнитные потери в сердечнике статора; $P_{мех}$ – механические потери.

Электрические потери в обмотке статора:

$$P_{эл10} = m_1 \cdot I_{ОРН}^2 \cdot \left(\frac{\gamma}{\alpha}\right)^2 \cdot r_1 \cdot m_{t_1}, \quad (9)$$

где m_{t_1} – температурный коэффициент, зависящий от класса нагревостойкости изоляции обмотки статора.

Магнитные потери в сердечнике статора:

$$P_{маг} = P_{магН} \cdot \alpha^{(n+2)}, \quad (10)$$

где $P_{магН}$ – магнитные потери при номинальных зна-

чениях частоты f_1 и напряжения U_1 ; $n = 1,3-1,6$ – коэффициент, зависящий от марки электротехнической стали сердечника.

Механические потери можно определить из выражения [4]:

$$P_{мех} = P_{мехН} \cdot \alpha^\kappa, \quad (11)$$

где $P_{мехН}$ – механические потери при номинальной частоте вращения двигателя; $\kappa = 1-1,5$ – коэффициент, определяемый габаритами двигателя и конструкцией подшипниковых узлов.

Активная составляющая тока холостого хода:

$$I_{оа} = \frac{\sum P_o}{m_1 \cdot U_{1н} \cdot \gamma}. \quad (12)$$

Полный ток статора:

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1P}^2}. \quad (13)$$

Коэффициент мощности двигателя:

$$\cos \varphi = \frac{I_{1a}}{I_1}. \quad (14)$$

Подведенная к двигателю активная мощность:

$$P_1 = m_1 \cdot U_{1н} \cdot \gamma \cdot I_{1a}. \quad (15)$$

Полные потери в двигателе:

$$\sum P = P_{эл1} + P_{эл2} + P_{маг} + P_{мех} + P_{доб}. \quad (16)$$

Электрические потери в обмотке статора:

$$P_{эл1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot m_{t_1}. \quad (17)$$

Электрические потери в обмотке ротора:

$$P_{эл2} = m_1 \cdot \left(\frac{U_{1н} \cdot \gamma}{Z_{к\beta}}\right)^2 \cdot r_2' \cdot m_{t_2}, \quad (18)$$

где m_{t_2} – температурный коэффициент, зависящий от температуры нагрева обмотки ротора.

Потери магнитные и механические определяются по выражениям (10) – (11). Добавочные потери при синусоидальной форме питающего напряжения принимаются в среднем 1 % потребляемой двигателем мощности [2].

Если форма питающего напряжения ступенчатая, что характерно для АИН без ШИМ, то возникают добавочные магнитные и электрические потери от высших гармоник напряжения [1].

При расчете добавочных электрических потерь необходимо учитывать уменьшение индуктивного сопротивления рассеяния ротора и увеличение активного сопротивления обмоток ротора за счет эффекта вытеснения тока [5].

Величина полезной мощности:

$$P_2 = P_1 - \sum P. \quad (19)$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (20)$$

Электромагнитный момент двигателя в соответствии с [3] при номинальных U_1 и f_1 :

$$M = \frac{P_{эл2}}{\Omega_1 \cdot S} = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_{1н}^2 \cdot r_2'}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н} \cdot S \cdot Z_{к\beta}^2}. \quad (21)$$

где $Z_{к\beta}$ определяется по выражению (3), если $\alpha = 1$, то относительное скольжение S равно абсолютному скольжению β .

Для частотноуправляемого двигателя электромагнитный момент:

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot (U_{1н} \cdot \gamma)^2 \cdot r_2'}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н} \cdot \beta \cdot Z_{k\beta}^2}, \quad (22)$$

где p – число пар полюсов обмотки статора.

Полезный момент на валу двигателя:

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega_{1н} \cdot (\alpha - \beta)}, \quad (23)$$

где $\Omega_{1н} = 2 \cdot \pi \cdot f_{1н} / p$.

Приведенная методика была использована для расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя АН4 – 17-45-10 (номинальные данные: $P_2 = 1600$ кВт, $U_{1н} = 6000$ В, синхронная частота вращения $n_1 = 600$ об/мин).

Расчет рабочих характеристик, включая коэффициент мощности и коэффициент полезного действия проводился для нерегулируемого двигателя при переменной нагрузке и его же, как частотноуправляемого при том же диапазоне изменения нагрузки на валу и квадратичном законе регулирования. Зависимость $\cos\varphi = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $K_{эн} = \eta \cdot \cos\varphi = f(P_2)$ для нерегулируемого двигателя приведена на рис. 2.

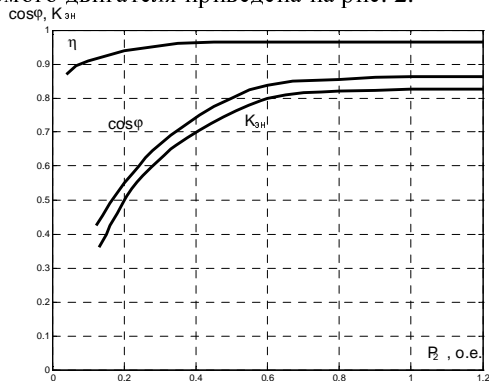


Рис. 2. Зависимости нерегулируемого двигателя

Характеристики частотноуправляемого двигателя рассчитывались в диапазоне изменения коэффициента регулирования $\alpha = 1,0-0,4$ при постоянном абсолютном скольжении $\beta = 0,008$, что соответствует значению относительного скольжения S в режиме номинальной нагрузки и $\alpha = 1$. Характеристики в зависимости от коэффициента регулирования α приведены на рис. 3 в относительных единицах.

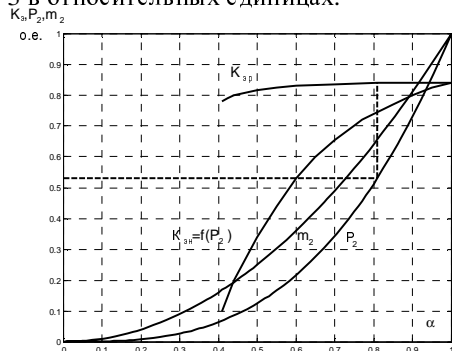


Рис. 3. Зависимости частотноуправляемого двигателя

Расчетная кривая полезной мощности $P_2 = f(\alpha)$ представляет собой кубическую параболу $P_2 \approx \alpha^3$, а полезный момент $m_2 = f(\alpha)$ – квадратичную параболу ($m_2 \approx \alpha^2$), что соответствует работе двигателя в режиме вентиляторной нагрузки. Там же приведена зависимость энергетического коэффициента частотноуправляемого двигателя $K_{эп} = f(\alpha)$ и зависимость энергетического коэффициента нерегулируемого дви-

гателя $K_{эн} = f(P_2)$ (перестроена с рис. 2).

Анализ результатов расчета показывает, что изменение частоты питающего напряжения $f_1 = f_{1н} \cdot \alpha$ при квадратичном законе регулирования $\gamma = \alpha^2$ приводит к изменению полезной мощности на валу, а значит к изменению энергетического коэффициента $K_{эп}$. Однако, в диапазоне принятого изменения коэффициента регулирования α , изменение $K_{эп}$ происходит в небольших пределах ($K_{эп} = 0,785$ при $\alpha = 0,4$ и $K_{эп} = 0,84$ при $\alpha = 1,0$). Изменение энергетического коэффициента нерегулируемого двигателя $K_{эн} = f(P_2)$ при изменении нагрузки на валу весьма значительно и при малых мощностях $K_{эн}$ резко уменьшается, как показано на рис. 2. Сравнение значений $K_{эн}$ и $K_{эп}$ при одинаковой полезной мощности двигателя требуют дополнительного построения (показано пунктиром на рис. 3). По заданной P_2 , используя $P_2 = f(\alpha)$ определяем $K_{эп}$ из кривой $K_{эп} = f(\alpha)$ и $K_{эн}$ из кривой $K_{эн} = f(P_2)$. Например, для низшей ступени полезной мощности $P_2 = 0,4$ о.е. для энергетических коэффициентов получим $K_{эп} = 0,83$ и $K_{эн} = 0,66$ соответственно, т.е. энергетический коэффициент увеличился на 25,7 % от своего значения для нерегулируемого двигателя.

Предложенная методика расчета рабочих характеристик частотноуправляемых асинхронных двигателей позволяет определить их энергетические показатели, а сравнительный анализ энергетических показателей нерегулируемых и частотноуправляемых асинхронных двигателей показал, что использование частотноуправляемых двигателей в приводах с переменной нагрузкой на валу позволяет существенно повысить энергетическую эффективность асинхронных двигателей, как основных потребителей электроэнергии на собственные нужды электростанции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины. Асинхронные машины. – М.: Высшая школа, 1980. – 328 с.
2. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: "Энергия", 1974. – 326 с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 903 с.
4. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1980. – 486 с.
5. Асинхронные двигатели общего назначения. Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.

Поступила 22.09.2009

Вороновский Геннадий Кириллович, д.т.н.
член-корреспондент НАН Украины
Орловский Игорь Викторович
Гончарова Екатерина Евгеньевна
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические станции"

G.K. Voronovskiy, I.V. Orlovskiy, E.E. Goncharova

Techniques of energy performance improvement for electric power users on power station own needs

Comparative analysis of power performance of noncontrolled and frequency-controlled asynchronous motors shows that frequency-controlled asynchronous motors application in shaf-tvariable-load drives allows substantial increase in power efficiency of the asynchronous motors as the basic electric power users on power-stations own needs.

Key words – frequency-controlled asynchronous motors, power-stations own needs, power efficiency increase