

## КПД АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ НАГРУЗОК

Докт. техн. наук, проф. ФИРАГО Б. И.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Канд. техн. наук, доц. ПАВЛЯЧИК Л.

*Вроцлавский политехнический институт*

Развитие современного регулируемого электропривода идет в направлении расширенного использования асинхронных короткозамкнутых двигателей (АД). Применяемые системы частотного управления АД разделяются на скалярные и векторные. Реализация скалярных систем частотного управления АД проще и дешевле векторных.

Разумно спроектированные и построенные скалярные системы частотного управления АД обеспечивают диапазон частотного регулирования скорости до 50:1 без обратной связи по скорости [1] при высокой жесткости механических характеристик двигателей, что во многих практических применениях является вполне достаточным. В некоторых случаях скалярные системы частотного управления по своим показателям даже превосходят бездатчиковые векторные системы [2].

В связи с возрастающим использованием АД в регулируемых электроприводах по технологическим и энергетическим соображениям актуальна задача оценки КПД частотно-регулируемого асинхронного электропривода на основе закона экономичного регулирования электродвигателей при различных видах статического момента М. П. Костенко. В этой статье рассматривается решение такой задачи.

КПД АД оценивается по известному выражению:

$$\eta = \frac{P_2}{\Delta P + P_2}; \quad (1)$$

$$P_2 = M_2 \omega; \quad (2)$$

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}, \quad (3)$$

где  $M_2$  – вращающий момент на валу АД;

$\omega$  – угловая скорость вала АД;

$\Delta P_{\text{пост}}$  – «постоянные» потери мощности в АД;

$\Delta P_{\text{пер}}$  – переменные потери мощности в АД.

Потери в стали АД определяем по выражению [3]

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст.ном}} \left( \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ном}}} \right)^2 \left( \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} \right)^q, \quad (4)$$

где  $q = 1, 3 \dots 1, 5$ .

Механические потери будем определять по [4]

$$\Delta P_{\text{мх}} = \Delta P_{\text{мх.ном}} \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2. \quad (5)$$

Закон М. П. Костенко частотного управления АД запишем применительно не к идеализированному, а к реальному двигателю, тогда вместо напряжения в него входит ЭДС  $E$

$$\frac{E}{E_{\text{ном}}} = \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} \sqrt{\frac{M_c}{M_{c.\text{ном}}}}, \quad (6)$$

где  $f_1, f_{1\text{ном}}$  – текущее и номинальные значения частоты;

$M_c, M_{c.\text{ном}}$  – текущее и номинальное значения статического момента;

$E, E_{\text{ном}}$  – текущее и номинальное значения ЭДС статора.

Так как отношение ЭДС  $E$  к частоте  $f_1$  пропорционально магнитному потоку  $\Phi$ ,

$$\frac{\Phi}{\Phi_{\text{ном}}} = \sqrt{\frac{M_c}{M_{c.\text{ном}}}}. \quad (7)$$

Статический момент  $M_c$  на валу АД можно записать в общем виде [5]

$$M_c = M_{c.\text{ном}} \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^n, \quad (8)$$

где  $n = -1; 0; 1; 2$ .

Вводя относительно безразмерные величины:

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}}; \quad v = \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}; \quad K_3 = \frac{M_c}{M_{c.\text{ном}}} \quad (9)$$

и принимая  $v \approx \alpha$ , получим выражение для суммарных потерь мощности в частотно-регулируемом АД:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пер.ном}} K_3^2 + \Delta P_{\text{ст.ном}} \alpha^{\frac{n}{2}+q} + \Delta P_{\text{мх.ном}} \alpha^2 + \Delta P_{\text{дн.ном}} \alpha^n, \quad (10)$$

где

$$\Delta P_{\text{пер.ном}} = \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) M_{\text{э.ном}} (\omega_{0\text{ном}} - \omega_{\text{ном}}); \quad (11)$$

$$\Delta P_{\text{мх.ном}} = (0,05 \dots 0,1) \Delta P_{\text{ном}}; \quad (12)$$

$$\Delta P_{\text{ст.ном}} = (0,015 \dots 0,02) \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}; \quad (13)$$

$$\Delta P = \frac{P_{\text{НОМ}}(1 - \eta_{\text{НОМ}})}{\eta_{\text{НОМ}}}; \quad (14)$$

$$\Delta P_{\text{МНОМ}} = 3I_{\text{МНОМ}}^2 R_1; \quad (15)$$

$$I_{\text{МНОМ}} = I_{\text{НОМ}} \left( \sin \varphi_{\text{НОМ}} - \frac{s_{\text{НОМ}}}{s_{\text{КК}}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} \right); \quad (16)$$

$$M_{\text{Э.НОМ}} = M_{\text{НОМ}} + \frac{\Delta P_{\text{МХ.НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}}, \quad (17)$$

где  $\Delta P_{\text{НОМ}}$  – номинальные потери мощности в АД;

$\Delta P_{\text{МХ.НОМ}}$ ,  $\Delta P_{\text{СТ.НОМ}}$ ,  $\Delta P_{\text{МНОМ}}$  – соответственно номинальные механические потери, потери в стали, потери в обмотке статора от протекания номинального намагничивающего тока  $I_{\text{МНОМ}}$ ;

$P_{\text{НОМ}}$ ,  $\omega_{\text{НОМ}}$ ,  $\eta_{\text{НОМ}}$ ,  $s_{\text{НОМ}}$ ,  $I_{\text{НОМ}}$  – номинальные мощность, угловая скорость, КПД, скольжение, ток статора;

$M_{\text{Э.НОМ}}$ ,  $M_{\text{НОМ}}$  – номинальные электромагнитный момент и момент на валу двигателя;

$s_{\text{КК}}$  – критическое скольжение на естественной характеристике;

$R_1$ ,  $R_2$  – активные сопротивления фазы статора  $R_1$  и ротора  $R_2$  (приведенное).

Учитывая, что механическая мощность  $P_2$  на валу АД

$$P_2 = M_2 \omega = K_3 \alpha P_{\text{НОМ}}, \quad (18)$$

на основании (1), (10) и (18) получаем общее выражение для КПД АД при частотном регулировании по экономичному закону

$$\eta = \frac{K_3 \alpha P_{\text{НОМ}}}{K_3 \alpha P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{ПЕР.НОМ}} K_3^2 + \Delta P_{\text{МХ.НОМ}} \alpha^2 + \Delta P_{\text{СТ.НОМ}} \alpha^{n/2+q} + \Delta P_{\text{МНОМ}} \alpha^n}. \quad (19)$$

Введем обозначения:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{\Delta P_{\text{МХ.НОМ}}}{\Delta P_{\text{ПЕР.НОМ}}}; \\ a_2 = \frac{\Delta P_{\text{СТ.НОМ}}}{\Delta P_{\text{ПЕР.НОМ}}}; \\ a_3 = \frac{\Delta P_{\text{МНОМ}}}{\Delta P_{\text{ПЕР.НОМ}}}, \end{cases} \quad (20)$$

тогда

$$\eta = \left[ 1 + \frac{\Delta P_{\text{ПЕР.НОМ}}}{P_{\text{НОМ}}} \left( \frac{K_3}{\alpha} + a_1 \frac{\alpha}{K_3} + a_2 \frac{\alpha^{(n/2+q-1)}}{K_3} + a_3 \frac{\alpha^{n-1}}{K_3} \right) \right]^{-1}. \quad (21)$$

Максимум КПД  $\eta$  наступает, когда переменные потери мощности равны «постоянным»

$$\Delta P_{\text{пер.ном}} K_{3.\text{опт}}^2 = \Delta P_{\text{мх.ном}} \alpha^2 + \Delta P_{\text{ст.ном}} \alpha^{n/2+q} + \Delta P_{\text{цном}} \alpha^n. \quad (22)$$

Из (22) с учетом (20) находим оптимальный коэффициент загрузки

$$K_{3.\text{опт}} = \sqrt{a_1 \alpha^2 + a_2 \alpha^{n/2+q} + a_3 \alpha^n}, \quad (23)$$

при котором достигается максимум КПД.

**Частные случаи нагрузок:**

$n = 0$ ;  $M_c = \text{const}$ ;  $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$  —

$$K_3 = \sqrt{a_1 \alpha^2 + a_2 \alpha^q + a_3}. \quad (24)$$

При  $q = 1,5$  (современные электротехнические стали) на основании (19) с учетом (24) можно найти выражение для максимального КПД для данного случая  $M_c = \text{const}$ :

$$\eta_{\text{max}} = \left\{ 1 + \frac{\Delta P_{\text{пер.ном}}}{P_{\text{ном}}} \left[ \frac{K_{3.\text{опт}}}{\alpha} + \frac{1}{K_{3.\text{опт}}} \left( a_1 \alpha + a_2 \sqrt{\alpha} + \frac{a_3}{\alpha} \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (25)$$

Анализ (24) и (25) показывает, что  $K_{3.\text{опт}}$  и  $\eta_{\text{max}}$  являются функциями относительной частоты  $\alpha$ , с уменьшением которой максимум КПД смещается в сторону меньших нагрузок и величина его уменьшается. Вследствие того, что для обычных АД коэффициент  $a_2$  в несколько раз превышает величину  $(a_1 + a_3)$  [6], оптимальный коэффициент загрузки  $K_{3.\text{опт}}$  практически линейно зависит от  $\alpha$  (рис. 1). Максимальные значения КПД в широком диапазоне изменений  $\alpha$  варьируются незначительно, начиная заметно уменьшаться при  $\alpha < 0,2$  (кривая 2 на рис. 2).

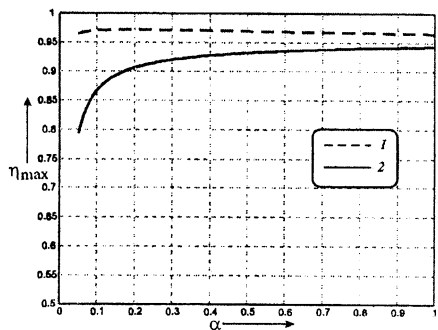
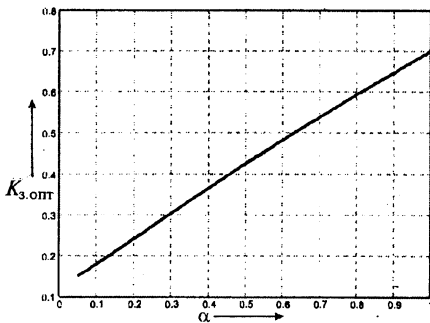


Рис. 1. Зависимость оптимального коэффициента загрузки  $K_{3.\text{опт}}$  от относительной частоты  $\alpha$  для АД типа 4А315S4У3 при  $M_c = \text{const}$

Рис. 2. Зависимость максимального значения КПД АД типа 4А315S4У3 от относительной частоты  $\alpha$ : 1 —  $n = 0$ ;  $\Phi = \Phi_{\text{ном}} \sqrt{K_3}$ ; 2 —  $n = 0$ ;  $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$

Можно найти, что при  $\alpha = 1$  выражение (25) преобразуется в хорошо известную формулу

$$\eta_{\max}(\alpha = 1) = \left( 1 + 2\sqrt{a} \frac{\Delta P_{\text{пер.ном}}}{P_{\text{ном}}} \right)^{-1}, \quad (26)$$

где  $a = \frac{\Delta P_{\text{пост.ном}}}{\Delta P_{\text{пер.ном}}}$ .

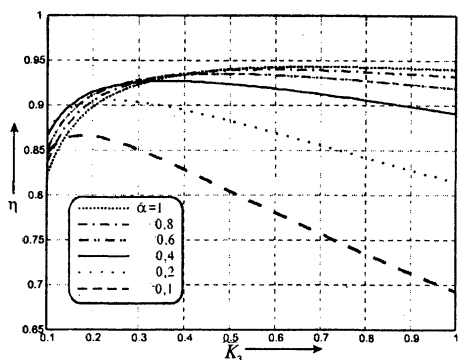


Рис. 3. Зависимость КПД АД типа 4А315S4У3 от коэффициента загрузки  $K_3$  при разных относительных частотах  $\alpha$  для случая:  $n = 0$ ;  $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$

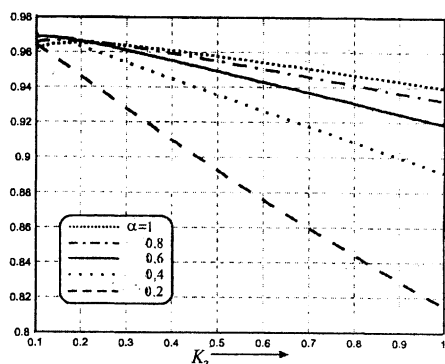


Рис. 4. Зависимость КПД АД типа 4А315S4У3 от коэффициента загрузки  $K_3$  при разных относительных частотах  $\alpha$  для случая:  $n = 0$ ;  $\Phi = \Phi_{\text{ном}} \sqrt{K_3}$

Зависимость КПД АД от коэффициента загрузки при фиксированных частотах приведена на рис. 3, из которого видно, что с уменьшением частоты максимум КПД заметнее проявляется и сужается область нагрузок, при которых двигатель имеет высокий КПД. Это имеет значение, например, для настройки системы управления электроприводом для работы по критерию максимума КПД.

Кроме рассмотренного случая частотного управления АД с постоянным магнитным потоком (например, подъемные механизмы, где требуется высокая перегрузочная способность), возможно в соответствии с (6) использовать управление, когда магнитный поток АД изменяется с варьированием нагрузки:

$$\Phi = \Phi_{\text{ном}} \sqrt{K_3}. \quad (27)$$

Такое управление целесообразно применять для механизмов, работающих значительное время при малых нагрузках. При данном управлении:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст.ном}} K_3 \alpha^q; \quad (28)$$

$$\Delta P_{\mu} = \Delta P_{\mu\text{ном}} K_3. \quad (29)$$

Это позволяет получить выражение для КПД АД в виде

$$\eta = \left[ 1 + \frac{\Delta P_{\text{пер.ном}}}{P_{\text{ном}}} \left( \frac{a_1 \alpha}{K_3} + a_2 \sqrt{\alpha} + \frac{a_3 + K_3}{\alpha} \right) \right]^{-1}. \quad (30)$$

Если относительную частоту  $\alpha$  взять за параметр, то можно найти оптимальный коэффициент загрузки

$$K_{з.опт} = \alpha\sqrt{a_1}, \quad (31)$$

при котором будет максимум КПД

$$\eta_{\max} = \left[ 1 + \frac{\Delta P_{\text{пер.ном}}}{P_{\text{ном}}} \left( 2\sqrt{a_1} + a_2\sqrt{\alpha} + \frac{a_3}{\alpha} \right) \right]^{-1}. \quad (32)$$

Однако максимальные значения КПД в этом случае достигаются при очень малых коэффициентах загрузки, причем с уменьшением частоты максимум КПД смещается в сторону меньших нагрузок. Поэтому в зоне низких частот  $K_{з.опт}$  и  $\eta_{\max}$  не представляют практического интереса. В рабочей области частот ( $0,1 < \alpha \leq 1$ ) величина  $\eta_{\max}$  весьма незначительно уменьшается с увеличением частоты (рис. 2, кривая 1). На рис. 4 представлены зависимости КПД (30) от коэффициента загрузки при фиксированных частотах для АД типа 4А315S4У3, которые показывают, что в области рабочих частот с увеличением нагрузки КПД уменьшается, но величины КПД в сопоставлении со значениями, приведенными на рис. 3, выше, кроме точек, соответствующих  $K_3 = 1$ , где они равны, что свидетельствует о целесообразности такого управления. Следует отметить, что при номинальной частоте ( $\alpha = 1$ , рис. 4) максимум КПД достигается в области рабочих частот АД;

$n = 1$ ;  $M_c = M_{c.ном} \alpha$ ;  $K_3 = \alpha$ . Характер нагрузки, соответствующий  $n = 1$ , довольно близок к нагрузкам транспортеров (конвейеров) и центробежных насосов, работающих при противодавлении больше 10 м. Диапазон регулирования скорости этих механизмов обычно не превышает 5:1. Для  $n = 1$  и  $q = 1,5$  выражение (19) можно преобразовать к виду

$$\eta = \left[ 1 + \frac{\Delta P_{\text{пер.ном}}}{P_{\text{ном}}} \left( 1 + a_1 + a_2 + \frac{a_3}{\alpha} \right) \right]^{-1}. \quad (33)$$

Как видно из (33), КПД является функцией относительной частоты  $\alpha$  и монотонно возрастает с увеличением  $\alpha$ . Однако вследствие того, что  $a_3 \ll (1 + a_1 + a_2)$ , зависимость КПД от  $\alpha$  слабая (рис. 5). Следует заметить, что если пренебречь коэффициентом  $a_3$ , то КПД при данном характере нагрузки будет постоянным, близким к номинальному значению;

$n = 2$ ;  $M_c = M_{c.ном} \alpha^2$ ;  $K_3 = \alpha^2$ . Нагрузку такого вида имеют центробежные насосы и вентиляторы, работающие без противодавления. При  $q = 1,5$ , исходя из (19), можно получить выражение КПД АД для этого вида нагрузки

$$\eta = \left[ 1 + \frac{\Delta P_{\text{пер.ном}}}{P_{\text{ном}}} \left( \alpha + \frac{a_1 + a_3}{\alpha} + \frac{a_2}{\sqrt{\alpha}} \right) \right]^{-1}. \quad (34)$$

Максимального значения КПД (34) достигает при частотах  $\alpha_{\max}$ , которые надо определять из уравнения

$$\alpha_{\max}^2 - a_2 \sqrt{\alpha_{\max}} - (a_1 + a_3) = 0. \quad (35)$$

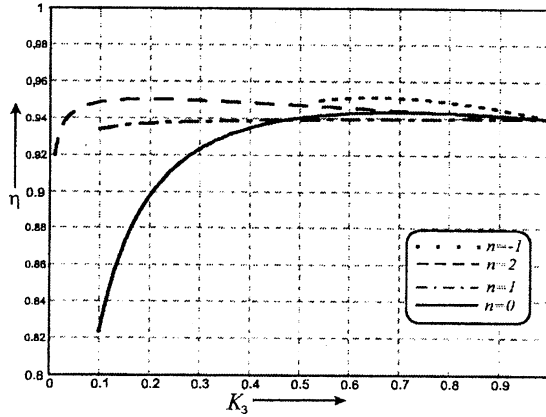


Рис. 5. Зависимость КПД АД типа А315S4У3 от коэффициента загрузки  $K_3$  при различных видах нагрузки:

- 1)  $n = 0$ ;  $M_c = \text{const}$ ;  $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ ;  $\alpha = 1$ ;
- 2)  $n = 1$ ;  $M_c = c\omega$ ;  $K_3 = \alpha$ ;
- 3)  $n = 2$ ;  $M_c = c\omega^2$ ;  $K_3 = \alpha^2$ ;
- 4)  $n = -1$ ;  $P_c = \text{const}$ ;  $K_3 = \alpha^{-1}$

Из-за невозможности явного выражения  $\alpha_{\max}$  из (35) оценку области частот, в пределах которых находится  $\alpha_{\max}$ , можно сделать по неравенству

$$\sqrt{(a_1 + a_3)} < \alpha_{\max} < \frac{a_2}{2} + \sqrt{\left(\frac{a_2}{2}\right)^2 + (a_1 + a_3)}. \quad (36)$$

При этом следует отметить слабую зависимость КПД (34) от коэффициента загрузки и, как следствие, нечеткое проявление максимума, однако при  $n = 2$  КПД двигателя больше, чем при  $n = 1$ ;

$n = -1$ ;  $M_c = M_{c,\text{ном}}/\alpha$ ;  $K_3 = \alpha^{-1}$ . Данный характер нагрузки имеют механизмы, работающие с постоянной мощностью. Промышленные электроприводы с двухзонным регулированием скорости такую нагрузку имеют при скоростях  $\omega_{\text{ном}} < \omega \leq \omega_{\max}$ , когда  $\alpha_{\max} > \alpha > 1$ .

Общее выражение КПД (21) для указанного характера нагрузки преобразуется к виду

$$\eta = \left[ 1 + \frac{\Delta P_{\text{пер.ном}}}{P_{\text{ном}}} \left( a_2 \alpha + a_1 \alpha^2 + \frac{a_3}{\alpha} + \frac{1}{\alpha^2} \right) \right]^{-1}. \quad (37)$$

Зависимость КПД (37) от коэффициента загрузки в рабочем диапазоне частот (обычно  $\alpha \leq 2$ ) очень слабая.

При таком характере нагрузки КПД асинхронного двигателя выше, хотя и незначительно, чем при других видах нагрузки (рис. 5,  $n = -1$ ).

В общем выражении КПД (21) относительные номинальные пере-

менные потери мощности могут быть записаны через номинальный КПД в виде

$$\frac{\Delta P_{\text{пер.ном}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{1}{a+1} \left( \frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right). \quad (38)$$

Иногда удобно использовать (38) при энергетических расчетах.

### ВЫВОДЫ

1. Для нагрузок типа  $M_c = \text{const}$  оптимальные значения коэффициентов загрузки, при которых достигается максимум КПД, изменяются практически пропорционально относительной частоте. При снижении частоты максимум КПД проявляется заметнее.

2. При  $M_c = \text{const}$  со снижением частоты максимум КПД смещается в зону меньших нагрузок, причем величина его уменьшается.

3. При нагрузках, зависящих от скорости ( $n > 0$ ), КПД в меньшей степени зависит от коэффициента загрузки, чем при  $M_c = \text{const}$ , а значения КПД возрастают с увеличением степени  $n$ .

4. Полученные аналитические выражения КПД асинхронного двигателя, управляемого по экономичному закону частотного регулирования, могут быть использованы при технико-экономическом обосновании регулируемых электроприводов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. The Journal of Industrial Power Transmission, Motors and Electronic Control // Drives and Controls. – March, May, 1999, U.K.

2. Dynamical load emulation test facility to evaluate the performance of AC inverters / S. R. Hewson, M. Summer, G. M. Asher and P. W. Wheeler // Power Engineering Journal. – 2000. – Vol. 14. – № 1. – P. 21–28.

3. Поздеев А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. унта, 1998.

4. Ключев В. И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

5. Андреев В. П., Сабинин Ю. А. Основы электропривода. – М.; Л.: ГЭИ, 1963.

6. Радин В. И. Электрические машины: Асинхронные машины. – М.: Высш. шк., 1988.

Представлена кафедрой электропривода  
и автоматизации промышленных установок  
и технологических комплексов

Поступила 20.03.2001