

DOI 10.8562/JEST.214.12

УДК 621.313.333.2

Ю.Ф. Кокунов

НОВЫЕ КРИТЕРИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКОЙ РОТОРА

Yu.F. Kokunov

NEW CRITERIA FOR ENERGY EFFICIENCY OF INDUCTION MOTORS WITH SQUIRREL-CAGE ROTOR WINDING

Рассмотрена возможность замены сложной схемы замещения асинхронной машины двумя эквивалентными сопротивлениями, зависящими от скольжения. Проведен анализ того, как разность этих сопротивлений зависит от скольжения. Это позволяет определить диапазон скольжений, в котором может быть достигнута высокая эффективность преобразования энергии при сохранении устойчивой работы. Приведены выражения для расчета этих скольжений.

АСИНХРОННАЯ МАШИНА; СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ; СКОЛЬЖЕНИЕ; ЭФФЕКТИВНОСТЬ; УСТОЙЧИВОСТЬ.

The explanation and method of calculation of motor slip and functions connected with it are introduced in this report. These functions are providing consumption of high and maximal electric energy by low-power asynchronous engine including asynchronous engine with squirrel-cage rotor. T equivalent circuit of asynchronous engine is used for investigation. Using electric T equivalent circuit of asynchronous engine implies that changing equivalent impedances, such as inductive reactance and active resistance, have dependence from motor slip (gliding). It promotes a problem of researching of the dependence difference and ratio of this impedance from motor slip when steady operation mode is used. This problem has solution by analytic and calculation methods and allows to define the parameters, such as $\cos \phi$, useful capacity, input current, in a narrow interval of gliding during the operation mode. The expression for calculating extreme gliding which limits the area with high and maximal coefficient of using electric energy is shown. Study of dependence of actions of difference and ratio parts of equivalent impedances from gliding shows the existing of two glides. The least of them provides a higher coefficient of using electric energy. With increasing of gliding the aforementioned coefficient reaches its maximal value. The solution results confirm correctness of the chosen method.

INDUCTION MOTOR, SCHEME, SLIPPAGE, EFFICIENCY, STABILITY.

Практика расчета рабочих свойств асинхронных двигателей (АД) в основном базируется на использовании электрической Г-образной схемы замещения, с помощью которой, задавая ряд значений скольжений s , определяют интересующие параметры.

Среди последних для эксплуатации важны параметры номинального режима — полезная активная мощность $P_{2н}$, ток $I_{1н}$, КПД η_n , $\cos \phi_{1н}$ и др. Перечисленные параметры нельзя определить, если неизвестно скольжение s_n .

Впервые на основе анализа Т-образной схемы замещения в [6] показано, что величина

скольжения, близкая к s_n , соответствует максимальной разности активного и индуктивного эквивалентных сопротивлений [1, 3, 6, 7].

Однако не рассмотрен вопрос о связи скольжения и повышенной (или максимальной) величины $\cos \phi_1$ при сохранении устойчивой работы АД, критерием чего служит критическое скольжение s_m .

Цель представленной работы — выявить исходя из Т-образной схемы замещения границы изменения скольжения, в пределах которых обеспечивается повышенная или максимальная величина $\cos \phi_1$ при сохранении устойчивой работы

АД (на примере АДК — асинхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора).

В работе используются расчетный и аналитический методы установления границ скольжений: SM (скольжение, при котором $\cos\varphi_1$ — высокий) и $s_{\xi 1}$ (скольжение, когда $\cos\varphi_1$ достигает максимальной величины).

В опубликованной работе [6] рассмотрены зависимости $r_{1\Omega}$ и $x_{1\Omega}$ от скольжения $s_0 \leq s \leq 1$. Ранее в [1, 3] приведены аналогичные зависимости.

В [6] отмечается, что существуют скольжения $S1$ и $S2$, при которых наблюдаются равенства сопротивлений $r_{1\Omega}(S1) = x_{1\Omega}(S1)$ и $r_{1\Omega}(S2) = x_{1\Omega}(S2)$.

Внутри промежутка скольжений $S1 < s < S2$ имеет место неравенство $r_{1\Omega}(s) > x_{1\Omega}(s)$. Можно предположить, что разность $r_{1\Omega}(s) - x_{1\Omega}(s)$ при некотором скольжении SM достигнет наибольшей величины.

Однако в [6] не проведен анализ влияния изменяющихся эквивалентных сопротивлений на коэффициент мощности $\cos\varphi_1$ и на границу устойчивой работы, определяемую величиной максимального электромагнитного момента $M_{\Omega M}$.

Выражения для активного $r_{1\Omega}(s)$ и индуктивного $x_{1\Omega}(s)$ эквивалентных сопротивлений, зависящие от скольжения s и сопротивлений Т-образной схемы замещения асинхронной машины, представляются достаточно громоздкими и неудобными для последующего анализа:

$$r_{1\Omega}(s) = r_1 + \frac{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_{\sigma 2}'^2}{\left(\frac{r_2'}{s} + r_m\right)^2 + \left(x_{\sigma 2}' + x_m\right)^2} r_m + \frac{\left(r_m^2 + x_m^2\right)\left(\frac{r_2'}{s}\right)}{\left(\frac{r_2'}{s} + r_m\right)^2 + \left(x_{\sigma 2}' + x_m\right)^2}; \quad (1)$$

$$x_{1\Omega}(s) = x_{\sigma 1} + \frac{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_{\sigma 2}'^2}{\left(\frac{r_2'}{s} + r_m\right)^2 + \left(x_{\sigma 2}' + x_m\right)^2} x_m + \frac{\left(r_m^2 + x_m^2\right)x_{\sigma 2}'}{\left(\frac{r_2'}{s} + r_m\right)^2 + \left(x_{\sigma 2}' + x_m\right)^2}. \quad (2)$$

Преобразуем их к более удобному для анализа виду:

$$r_{1\Omega}(s) = r_1 + \frac{r_m x_{\sigma 2}'^2 s^2 + r_2' \left(r_m^2 + x_m^2\right) s + r_2'^2 r_m}{\left(r_m^2 + \left(x_{\sigma 2}' + x_m\right)^2\right) s^2 + 2r_2' r_m s + r_2'^2}. \quad (3)$$

$$x_{1\Omega}(s) = x_{\sigma 1} + \frac{\left(x_m x_{\sigma 2}'^2 + x_{\sigma 2}' \left(r_m^2 + x_m^2\right)\right) s^2 + r_2'^2 x_m}{\left(r_m^2 + \left(x_{\sigma 2}' + x_m\right)^2\right) s^2 + 2r_2' r_m s + r_2'^2}. \quad (4)$$

Здесь изменяемые части эквивалентных сопротивлений представлены отношениями функций, зависящими от параметров Т-образной схемы замещения и от s (точнее от s^2 и s). Такой прием с успехом применяют, например, при рассмотрении несимметричных управляемых асинхронных машин [10]. Поскольку параметры схемы замещения в общей теории [2, 4, 8] асинхронных машин (АМ) принимают неизменными, то для сокращения записи и последующих преобразований введем обозначения:

$$A = r_m x_{\sigma 2}'^2; \quad B = r_2' \left(r_m^2 + x_m^2\right); \quad C = r_2'^2 r_m; \\ D = r_m^2 + \left(x_{\sigma 2}' + x_m\right)^2; \quad E = 2r_2' r_m; \quad F = r_2'^2; \\ A_1 = x_{\sigma 2}'^2 x_m + \left(r_m^2 + x_m^2\right) x_{\sigma 2}'; \quad C_1 = r_2'^2 x_m.$$

Тогда формулы (3) и (4) приобретают вид

$$r_{1\Omega}(s) = r_1 + \frac{As^2 + Bs + C}{Ds^2 + Es + F}; \quad (5)$$

$$x_{1\Omega}(s) = x_{\sigma 1} + \frac{A_1 s^2 + C_1}{Ds^2 + Es + F}. \quad (6)$$

Выяснить поведение разности сопротивлений — $\Delta_{rx}(s) = r_{1\Omega}(s) - x_{1\Omega}(s)$ — при известных сопротивлениях схемы замещения, в частности Т-образной, можно двумя способами: 1) рассчитать $r_{1\Omega}(s)$ и $x_{1\Omega}(s)$ и найти разность Δ_{rx} ; 2) найти аналитическое решение, пригодное для последующего анализа.

Первый способ позволяет выявить особенности поведения разности Δ_{rx} при изменении скольжения в пределах $[S1, S2]$. Очевидно, что это решение имеет максимальную величину $\Delta_{rx M}$ при некотором скольжении SM . Весь цикл расчетов и графических построений для АД с другими сопротивлениями необходимо повторить.

Величины $S1$ и $S2$, $\Delta_{rx M}$, SM могут различаться для АД с разными параметрами. В этом случае удобнее рассматривать относительную разность, выбрав в качестве базисной величину $r_{1\Omega}(S1)$: $\frac{\Delta_{rx}(s)}{\Delta_{rx}(S1)} = \Delta_{rx}(s) / r_{1\Omega}(S1)$, о. е. При $s = S1$ относительная разность $\frac{\Delta_{rx}(s)}{\Delta_{rx}(S1)}$ равна нулю. Дальней-

шее увеличение s не приводит к возрастанию $\Delta_{rx}(s)$ выше единицы: так как при $s < S2$ значение $r_{1\sigma}(S1) > r_{1\sigma}(s)$ и $r_{1\sigma}(s) > x_{1\sigma}(s)$. Предлагаемый прием не искажает сущность основной закономерности изменения относительной разности от скольжения. Рассчитанные зависимости $\Delta_{rx}(s)$ для нескольких АД с номинальными мощностями P_{2H} в диапазоне 3–15 кВт представлены на рис. 1.

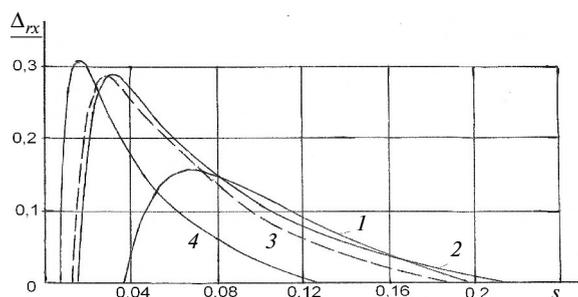


Рис. 1. Изменение относительной разности Δ_{rx} от скольжения s для АД с мощностями 3 (1), 5,5 (2), 11 (3) и 15 (4) кВт

Расчеты проведены по исходным формулам (1), (2), позволившим найти сопротивления и определить разность $\Delta_{rx}(s)$ при различных скольжениях s . Далее необходимо найти граничные значения скольжений, при которых выполнимо равенство сопротивлений $r_{1\sigma}(s) = x_{1\sigma}(s)$, и определить относительную разность $\Delta_{rx}(s)$. Формулы (1), (2) для аналитических исследований сложны.

Целесообразно, используя формулы (5) и (6), представить разность сопротивлений $\Delta_{rx}(s)$ более удобной для анализа зависимостью:

$$\begin{aligned} \Delta_{rx}(s) &= r_{1\sigma}(s) - x_{1\sigma}(s) = \\ &= (r_1 - x_{\sigma 1}) + \frac{(A - A_1)s^2 + Bs + (C - C_1)}{Ds^2 + Es + F}. \end{aligned} \quad (7)$$

Как следует из (7), $\Delta_{rx}(s)$ зависит от скольжения. Приравняем первую производную по s нулю с целью обнаружения экстремальной точки: $\frac{d(\Delta_{rx}(s))}{ds} = 0$.

После выполнения преобразований получим уравнение

$$s^2 - 2 \frac{(A - A_1)F - (C - C_1)D}{BD - (A - A_1)E} s -$$

$$- \frac{BF - (C - C_1)E}{BD - (A - A_1)E} = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения для двигательного режима АД будет следующим:

$$\begin{aligned} SM &= \frac{(A - A_1)F - (C - C_1)D}{BD - (A - A_1)E} \times \\ &\times \left[1 + \sqrt{1 + \frac{[BF - (C - C_1)E][BD - (A - A_1)E]}{[(A - A_1)F - (C - C_1)D]^2}} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Формула (9) позволяет рассчитать величину скольжения SM , не прибегая к расчетам по формулам (1), (2) или (3), (4), и определить максимальную разность $\Delta_{rx}(SM)$ по (7).

Следует заметить, что величина SM зависит от сопротивлений схемы замещения для каждого АД и не является постоянной, стало быть и максимальная разность $\Delta_{rx}(SM)$ не может быть постоянной.

Отраженные на рис. 1 расчетные зависимости Δ_{rx} от скольжения s демонстрируют наличие скольжения SM , при котором Δ_{rx} достигает максимальной величины. Из рис. 1 следует, что существуют две точки (со скольжениями $S1$ и $S2$), в которых $\Delta_{rx} = 0$, а также выделяется точка при скольжении SM с максимальной величиной Δ_{rxM} , как было отмечено выше.

Это скольжение SM разделяет область скольжений $[S1, S2]$ на два участка — $S1 < s \leq SM$ и $SM < s < S2$, не равных по величине ($SM - S1 < S2 - SM$) и с разной крутизной $\frac{\Delta_{rx}}{\Delta s}$. На первом

участке $\frac{\Delta_{rx}}{\Delta s} > 0$, для второго участка $\frac{\Delta_{rx}}{\Delta s} < 0$ (здесь под Δ_{rx} следует понимать отношения приращения функции Δ_{rx} , изображенной на рис. 1, к задаваемому приращению Δs скольжения). Крутизна характеристики в пределах участка непостоянна — зависит от мощности АД и сопротивлений Т-образной схемы замещения. Особенно это заметно для АД с $P_{2H} > 7,5$ кВт на втором участке скольжений $[SM, S2]$. Такое же постоянство крутизны характерно и для первого участка $[S1, SM]$, но оно более четко выражено у АД малой мощности ($P_{2H} < 5$ кВт).

Расчетные результаты приведены в табл. 1 и подтверждают изложенные ранее предполо-

Таблица 1

Результаты расчета особых скольжений для АДК
при $p = 2, m = 3 f = 50$ Гц, $U_{1\text{фн}} = 220$ В

| $P_{2\text{н}}$, кВт | 3 | 4 | 5,5 | 11 | 15 |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|------------------------|
| $S1$ | 0,0377 | 0,0172 | 0,0164 | 0,0103 | $7,6638 \cdot 10^{-3}$ |
| $s_{\text{н}}$ | 0,0458 | 0,0369 | 0,0397 | 0,0229 | 0,02135 |
| $S2$ | 0,1945 | 0,2901 | 0,3303 | 0,2072 | 0,1482 |
| SM | 0,0684 | 0,0382 | 0,0372 | 0,0230 | 0,0169 |
| $M_{\text{эн}}$, Нм | 20,45 | 27,43 | 36,995 | 72,947 | 98,96 |
| $\cos\varphi_{1\text{н}}$ | 0,743 | 0,8565 | 0,8727 | 0,8711 | 0,8920 |
| s_{ξ} | 0,0822 | 0,0642 | 0,0654 | 0,0421 | 0,0314 |

жения. Кроме того, сопоставляя величины скольжений — номинального $s_{\text{н}}$ и SM , при котором Δ_{rx} достигает максимального значения, можно утверждать, что $s_{\text{н}}$ находится в окрестности скольжения SM . Чем ближе $s_{\text{н}}$ к SM , тем выше $\cos\varphi_{1\text{н}}$, что наблюдается у АДК с мощностями $P_{2\text{н}}$, равными 4,0; 5,5; 11 кВт.

Обратив внимание на существование скольжений $S1$ и $S2$, при которых $\Delta_{\text{rx}} = 0$, определим местоположение критического скольжения s_m , при котором электромагнитный момент достигает максимальной величины $M_{\text{эм}}$ [2, 4, 5, 8], ограничивающей зону устойчивой работы.

При использовании Г-образной схемы замещения величину критического скольжения s_m определяют по формуле

$$s_m = \frac{C_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}' C_1)^2}}, \quad (10)$$

где C_1 — коэффициент перерасчета сопротивления Г-образной схемы замещения при переходе к Г-образной схеме. Коэффициент C_1 — в общем случае комплексная величина, но без большой погрешности можно использовать лишь активную его составляющую [1, 2, 4, 8], представляя ее в двух видах:

$$C_1 \approx 1 + \frac{x_{\sigma 1}}{x_m}; \quad (11)$$

$$C_1 \approx 1 + \frac{r_1 r_m + x_{\sigma 1} x}{r_m^2 + x_m^2}. \quad (12)$$

При использовании Г-образной схемы замещения установить связь $M_{\text{эм}}$ и соответствующего скольжения s_m можно расчетным путем, принимая во внимание (10).

Коэффициенты C_1 , рассчитанные по (11) и (12), и соответствующие этим коэффициентам величины критического скольжения s_m и максимального электромагнитного момента (по Т-образной схеме замещения см. табл. 2) определены расчетным путем для ряда АДК.

Реализован поиск $M_{\text{эм}}$ и соответствующего скольжения s_m без применения формулы (10). При таком подходе рассчитывается $M_{\text{э}} \approx M_{\text{эм}}$

В табл. 2 приведены величины $\cos\varphi_{1m}$, полученные расчетом для максимального электромагнитного момента.

Сравнение величин $M_{\text{эм}}$, полученных исходя из величин критического скольжения s_m , рассчитанных по (10), и $M_{\text{эм}}$, определяющих s_m и найденных поиском (в таблице 2 — «поиск»), показывает удовлетворительное совпадение.

Из табл. 1 и 2 следует, что значения критических скольжений s_m различны для АДК разной мощности. Если у двигателей с $P_{2\text{н}} = 3-5,5$ кВт s_m приближается к $S2$ (хотя $s_m < S2$, но разница достаточно мала), то у АДК большей мощности s_m заметно меньше $S2$: $s_m/S2 = 0,638-0,8136$

Затронув вопрос о коэффициенте мощности $\cos\varphi_1$, характеризующем потребляемую активную электрическую мощность, следует отметить, что для всех электрических машин переменного тока он зависит в том числе от полезной мощности P_2 . Рассматривая для асинхронной машины связь $\cos\varphi_1$ и эквивалентных составляющих сопротивлений $r_{1\text{э}}(s)$ и зависимость $x_{1\text{э}}(s)$, следует рассматривать и $\cos\varphi_1(s)$:

$$\cos\varphi_1(s) = \frac{r_{1\text{э}}(s)}{\sqrt{r_{1\text{э}}^2(s) + x_{1\text{э}}^2(s)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{x_{1\text{э}}(s)}{r_{1\text{э}}(s)}\right)^2}}.$$

Таблица 2

Сравнение критических величин, полученных при использовании формул (11), (12) для Г-образной схемы и расчетом по Т-образной

| $P_{2н}, \text{ кВт}$ | C_1 | | s_m | | | $M_{эм}, \text{ Нм}$ | | | $\cos\varphi_{1m}$ |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|--------|----------------------|----------|----------|--------------------|
| | по (11) | по (12) | по (11) | по (12) | поиск | по (11) | по (12) | поиск | |
| 3 | 1,0699 | 1,0715 | 0,1783 | 0,1784 | 0,1780 | 37,4525 | 37,4525 | 37,465 | 0,7214 |
| 4 | 1,0325 | 1,03338 | 0,2034 | 0,2035 | 0,2034 | 65,9404 | 65,9405 | 65,9406 | 0,7763 |
| 7,5 | 1,0286 | 1,0298 | 0,1937 | 0,1938 | 0,1675 | 121,2219 | 121,2217 | 124,3352 | 0,7715 |
| 15 | 1,0278 | 1,0280 | 0,1215 | 0,1216 | 0,1215 | 255,1204 | 255,1203 | 255,1204 | 0,7535 |
| 22 | 1,0297 | 1,0299 | 0,0967 | 0,0967 | 0,0967 | 311,5635 | 311,5635 | 311,5632 | 0,7176 |

Для упрощения записи введем обозначение $\xi(s) = \frac{x_{1Э}(s)}{r_{1Э}(s)}$ и представим $\cos\varphi_1(s)$ в виде

$$\cos\varphi_1(s) = \frac{1}{\sqrt{1+(\xi(s))^2}} \quad (13)$$

Ранее было отмечено, что при скольжении $S1$ и $S2$ величина $\xi(S1) = \frac{x(S1)}{r(S1)} = 1$, поскольку $r(S1) = x(S1)$, $r(S2) = x(S2)$ и $\xi(S2) = 1$. При этих скольжениях $\cos\varphi_1(S1) = \cos\varphi_1(S2) = 0,7071068$. Поскольку при $S1 < s < S2$ имеет место $r_{1Э}(s) > x_{1Э}(s)$, то при увеличении скольжения s выше $S1$ (рис. 2) коэффициент $\xi(s)$ будет уменьшаться до минимальной величины, а затем снова возрастать. Если при некотором скольжении s_ξ коэффициент имеет минимальную величину, то $\cos\varphi_1(s_\xi)$ достигает максимума.

Будет ли s_ξ находиться в области устойчивой работы АД и какая при этом ожидается максимальная величина $\cos\varphi_1(s_\xi)$? Этот вопрос необходимо исследовать.

Использование выражений эквивалентных составляющих сопротивлений (5) и (6) для получения зависимости коэффициента $\xi(s)$ от скольжения приводит к соотношению

$$\xi(s) = \frac{(x_{\sigma 1} D + A_1) s^2 + E x_{\sigma 1} s + (x_{\sigma 1} F + C_1)}{(r_1 D + A) s^2 + (r_1 E + B) s + (r_1 F + C)} \quad (14)$$

Для разыскания экстремальных точек следует получить уравнение исходя из условия

$$\frac{d}{ds}(\xi(s)) = 0 \quad (15)$$

Выполнение операции определения первой производной и приравнивание ее к нулю с последующими преобразованиями приводят к квадратному уравнению

$$s^2 + \frac{SY2}{SY1} s + \frac{SY3}{SY1} = 0, \quad (16)$$

где $SY1 = A_1(r_1 E + B) + x_{\sigma 1}(DB - AF)$;

$SY2 = r_1(A_1 F - C_1 D) + x_{\sigma 1}(CD - AF) + (A_1 C - AC_1)$;

$SY3 = x_{\sigma 1}(EC - FB) - C_1(r_1 E + B)$.

Как следует из (16), коэффициенты уравнения представляют сложные зависимости от сопротивлений Т-образной схемы замещения.

Для сокращения записи уравнения (16) введены коэффициенты $a = \frac{SY2}{SY1}$, $b = \frac{SY3}{SY1}$, что позволяет представить (16) в виде

$$s^2 + 2as + b = 0. \quad (17)$$

Существуют два решения уравнения (17):

$$s_{\xi 1} = -a + \sqrt{a^2 - b}, \quad s_{\xi 2} = -a - \sqrt{a^2 - b}.$$

Скольжение $s_{\xi 1} > 0$ характерно для асинхронного двигателя; скольжение $s_{\xi 2} < 0$ нужно отнести к генераторному режиму. Следует отметить, что $|s_{\xi 1}| > |s_{\xi 2}|$.

Подстановкой $s_{\xi 1}$ в (17) находится величина $\xi(s_{\xi 1})$, что позволяет определить максимальную величину $\cos\varphi_1(s_\xi)$ по (13).

Результаты проведенных расчетов коэффициента $\xi(s)$ по приведенным формулам отражены на рис. 2. Зависимости функции $\xi(s)$ представлены для АДК разных мощностей.

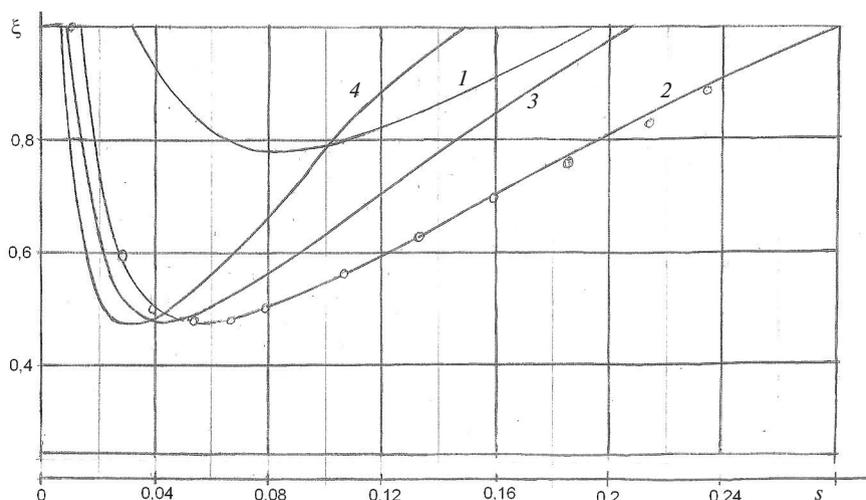


Рис. 2. Изменение коэффициента $\xi(s)$ от скольжения для АДК разных мощностей $P_{2н}$: 1 – 3; 2 – 5,5; 3 – 11; 4 – 15 кВт; кружками, расположенными около кривой 2, отмечено поведение $\xi(s)$ для $P_{2н} = 7,5$ кВт

Кривые $\xi(s)$ отражают основные особенности при скольжениях в диапазоне от $S1$ до $S2$, где $\xi(S1) = \xi(S2) = 1$.

Коэффициент $\xi(s)$ достигает минимальной величины при различных скольжениях s_{ξ} , зависящих от мощности $P_{2н}$. Меньшей мощности соответствует большая величина s_{ξ} .

Кривые рис. 2 имеют разные по ширине области скольжений, в пределах которых коэффициенты ξ мало отличаются от минимальной величины $\xi_{min}(s)$. Ширина области мала для двигателей большей мощности $P_{2н}$, а для АДК меньшей мощности ширина области больше.

Крутизна зависимостей $\xi(s)$ различна для разных диапазонов скольжений: при $s > S1$ кру-

тизна отрицательна в области до $s = s_{\xi}$ и положительна при $s > s_{\xi}$.

На рис. 3 представлены результаты расчета коэффициента мощности $\cos\phi_1(s)$ при изменении скольжения в диапазоне $S1 < s < S2$ для двигателей АДК тех же мощностей, что и на рис. 2.

Изменение коэффициента $\xi(s)$ отражается на зависимости $\cos\phi_1(s)$ (см. рис. 3). Здесь также проявляется тенденция изменения диапазона скольжения, в пределах которых $\cos\phi_1(s) \approx \cos\phi_{1max}(s_{\xi})$: уменьшение мощности $P_{2н}$ приводит к увеличению этого диапазона скольжений (в пределах от 0,065 до 0,1), а для $P_{2н} = 15$ кВт эта область скольжений сокращается до [0,02–0,04].

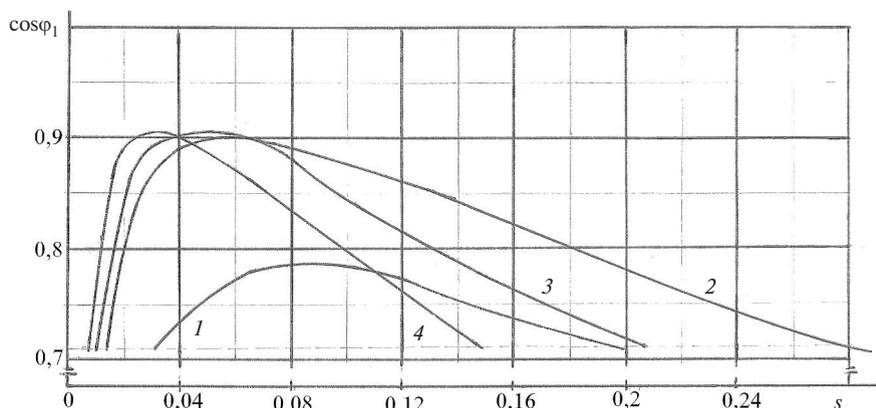


Рис. 3. Зависимости $\cos\phi_1(s)$ для АДК разных номинальных мощностей $P_{2н}$: 1 – 3; 2 – 5,5; 3 – 11; 4 – 15 кВт

У некоторых рассмотренных АДК, имеющих мощности $P_{2н} = 3-4$ кВт, расчетные величины $s_{\xi} < SM$ (табл. 1). Для двигателей больших мощностей наблюдается обратная зависимость: $s_{\xi} > SM$.

В табл. 1 приведены для некоторых АДК величины характерных скольжений: SM , при которых разность Δ_{rx} максимальна; s_n — номинальное; s_{ξ} — обеспечивающее максимальную величину $\cos \varphi_{1н}$. В табл. 2 приведены величины критических скольжений s_m для рассмотренных АДК.

Представляет интерес сравнить для рассмотренных АДК отношения скольжений: s_n/SM , s_{ξ}/SM , s_m/SM (табл. 3).

В табл. 3 приведены некоторые показатели номинального режима (η_n , $\cos \varphi_{1н}$, произведение $\eta_n \cos \varphi_{1н}$).

Сравнение подобных показателей для двигателей рассмотренных мощностей $P_{2н}$ свидетельствует: чем ближе отношение s_n/SM к единице (или несколько более единицы), тем выше $\cos \varphi_{1н}$. В табл. 3 повышение коэффициента мощности наблюдается у двигателей с мощностями от 5,5 до 22 кВт. Низкая величина $\cos \varphi_{1н}$ наблюдается у АДК с мощностями 3 и 4,5 кВт (менее 0,8). Однако двигатели имеют достаточно высокий КПД — $\eta > 0,8$, а общий коэффициент, характеризующий эффективность преобразования, определяемый произведением $\eta_n \cos \varphi_{1н}$, понижен за счет невысокого $\cos \varphi_{1н}$. У двигателей мощностью более 7,5 кВт отмеча-

ется обратная ситуация: возрастание $\cos \varphi_{1н}$ (более 0,85) сопровождается мало меняющимся η_n . В результате наблюдается небольшое возрастание произведения $\eta_n \cos \varphi_{1н}$ — от 0,785 до 0,828.

Выполненные исследования по использованию Т-образной схемы замещения при расчете характеристик АДК позволяют сделать следующие выводы.

Представленные выражения для разности эквивалентных сопротивлений Δ_{rx} дали возможность получить формулу расчета скольжения SM , при котором эта разность достигает максимальной величины, не прибегая к расчету зависимости Δ_{rx} от скольжения.

Величина скольжения SM зависит от сопротивлений Т-образной схемы замещения и величин скольжений $S1$ и $S2$. Скольжение SM находится в промежутке между ними ($S1 < SM < S2$), но ближе к $S1$.

Наибольшая величина $\cos \varphi_1$ имеет место при скольжении SM . Однако максимальной величины достигает при скольжении $s_{\xi 1}$, зависящем от сопротивлений Т-образной схемы замещения. Формула для расчета $s_{\xi 1}$ получена.

Критическое скольжение s_m , при котором электромагнитный момент достигает максимальной величины, меньше $S2$. Близость их зависит от полезной мощности АД $P_{2н}$ и с сопротивлений Т-образной схемы замещения.

Сравнение величин скольжений показывает, что $s_{\xi 1}$ меньше s_m , но больше SM . Стремление

Таблица 3

Сравнение относительных скольжений

| $P_{2н}$, кВт | s_n/SM | s_{ξ}/SM | s_m/SM | SM | η_n | $\cos \varphi_{1н}$ | $\eta_n \cos \varphi_{1н}$ |
|----------------|----------|--------------|----------|--------|----------|---------------------|----------------------------|
| 3 | 0,6693 | 1,2013 | 2,6001 | 0,0684 | 0,8115 | 0,7425 | 0,6025 |
| 4 | 0,9653 | 1,6806 | 3,1682 | 0,0382 | 0,8423 | 0,7763 | 0,7214 |
| 5,5 | 1,0676 | 1,7587 | 5,6686 | 0,0372 | 0,8522 | 0,8727 | 0,7437 |
| 11 | 0,9976 | 1,8303 | 6,6567 | 0,0230 | 0,8855 | 0,8711 | 0,7834 |
| 15 | 1,2504 | 1,8501 | 7,1549 | 0,0169 | 0,9132 | 0,8904 | 0,8146 |



приблизить номинальное скольжение s_n к $s_{\xi 1}$ с целью достижения более высокой, чем при скольжении SM , величины $\cos \varphi_1$ приводит к увеличению тока I_1 свыше номинального значения и приближению его к $I_1(s_m)$, что недопустимо.

Достаточно высокий $\cos \varphi_1$ достигается при скольжении $S1$ при равенстве сопротивлений $r_{1\sigma}(S1) = x_{1\sigma}(S1)$; при этом $\cos \varphi_1 = 0,707$.

Для АДК рассмотренных мощностей скольжение, соответствующее номинальной мощности P_{2H} , находится в области $SM \leq s_n < s_{\xi 1}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Важнов А.И.** Электрические машины. Л.: Энергия, 1968. 768 с.
2. **Вольдек А.И., Попов В.В.** Электрические машины. Машины переменного тока. М. — СПб.: Питер, 2007. 343 с.
3. **Ермолин Н.П.** Электрические машины малой мощности: Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е. М.: Высш. шк., 1967. 503 с.
4. **Гурин Я.С., Кузнецов Б.И.** Проектирование серий электрических машин. М.: Энергия, 1978. 480 с.
5. **Orlovskis G., Konuhova, Ketners K.** Comparison of Electromagnetic Torque Pulsations with DTC and FOC Control Methods for Induction Motor // Proceeding of the 14th International Scientific Conference Electric Power Engineering. 2013. Czech Republic. Kouty nad Desnou. 28–30 maijs 2013. (SKOPUS)
6. **Кокунюв Ю.Ф.** Новые алгоритмы использова-

ния Т-образной схемы замещения при расчете рабочих свойств асинхронных двигателей // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. №2. С. 81–86.

7. **Кокунюв Ю.Ф.** Расчет асинхронных двигателей малой мощности с короткозамкнутой обмоткой ротора // СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 142 с.

8. **Свириденко И.С., Гольдберг О.Д. [и др.].** Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко; Под ред. О.Д. Гольдберга. М.: Высш. шк., 1984. 431 с.

9. **Радин В.И., Розенкноп В.Д. [и др.].** Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / Под ред. В.И. Радина. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.

10. **Юферов Ф.М.** Электрические машины автоматических устройств. Учебник для вузов. М.: Высш. школа, 1976. 416 с.

REFERENCES

1. **Vazhnov A.I.** Elektricheskie mashiny. [Electrical machinery] L. Energiya, 1968. 768 s. (rus.)
2. **Voldek A.I., Popov V.V.** Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka. [Electrical machinery. AC machine] M. — SPb.: Piter, 2007. 343 s. (rus.)
3. **Yermolin N.P.** Elektricheskiye mashiny maloy moshchnosti: Ucheb. posobiye dlya vuzov. [Electrical machines of low power] M.: Vyssh. shk., 1967. 503 s. (rus.)
4. **Gurin Ya.S., Kuznetsov B.I.** Proyektirovaniye seriy elektricheskikh mashin. [Designing a series of electrical machines]. M.: Energiya, 1978. 480 s. (rus.)
5. **Orlovskis G., Konuhova., Ketners K.** Comparison of Electromagnetic Torque Pulsations with DTC and FOC Control Methods for Induction Motor. *Proceeding of the 14th International Scientific Conference Electric Power Engineering*. 2013, Czech Republic, Kouty nad Desnou, 28–30 maijs 2013. (SKOPUS)
6. **Kokunov Yu.F.** Novyye algoritmy ispolzovaniya T-obraznoy skhemy zameshcheniya pri raschete rabochikh svoystv asinkhronnykh dvigateley. [New algorithms use T-

equivalent circuit when calculating the working properties of induction motors]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbG-TU*. 2006. № 2. S. 81–86. (rus.)

7. **Kokunov Yu.F.** Raschet asinkhronnykh dvigateley maloy moshchnosti s korotkozamknutoy obmotkoy rotora. [Calculation of asynchronous motors with low power short-circuited winding rotor]. SPb.: Izd-vo Politekhn. Universiteta, 2011. 142 s. (rus.)

8. **Sviridenko I.S., Goldberg O.D. [i dr.].** Proyektirovaniye elektricheskikh mashin: Ucheb. dlya vuzov [Design of electrical machines] / O.D. Goldberg, Ya.S. Gurin, I.S. Sviridenko; Pod red. O.D. Goldberga / M.: Vyssh. shk. 1984. 431 s. (rus.)

9. **Radin V.I., Rozenkноп V.D. [i dr.].** Unifitsirovannaya seriya asinkhronnykh dvigateley Interelektro / Pod red. V.I. Radina [Unified series of asynchronous motors Interelektro]. M.: Energoatomizdat. 1990. 416 s. (rus.)

10. **Yuferov F.M.** Elektricheskiye mashiny avtomaticheskikh ustroystv. Uchebnyk dlya vuzov. [Electrical machinery automation devices]. M.: Vyssh. shkola, 1976. 416 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КОКУНЮВ Юрий Фёдорович — старший преподаватель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: kokulina@mail.ru

AUTHOR

KOKUNOV Yuriy F. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: kokulina@mail.ru