

### К РАСЧЕТУ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИНДИВИДУАЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В работе предлагается методика расчета емкости конденсатора для энергоэффективного асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности. Применительно к конструкции такого двигателя разработаны зависимости, позволяющие рассчитывать емкость компенсирующего конденсатора с учетом заданной величины коэффициента мощности электрической машины. Приводятся математические зависимости для различных вариантов электромагнитных схем асинхронного компенсированного двигателя.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, реактивная мощность, коэффициент мощности, конденсатор, электрическая схема замещения, энергоэффективность, математическая зависимость.

#### ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности электроприводов переменного тока возможно путем применения асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности [1-5]. В отличие от традиционных асинхронных двигателей (ТАД), в энергоэффективных асинхронных двигателях (ЭАД) с индивидуальной компенсацией реактивной мощности на статоре размещаются две трехфазные обмотки: рабочая обмотка, подключаемая к электросети, и компенсационная обмотка, подключаемая к трехфазному конденсатору определенной емкости. При определенных соотношениях параметров обмоток двигателя, магнитной системы и емкости компенсирующего конденсатора в электрической машине создается режим феррорезонанса токов, обеспечивающий коэффициент мощности электромеханического преобразователя, равный единице. В результате этого повышаются электрический и энергетический КПД, пусковой и критический моменты асинхронного двигателя.

Известны зависимости, позволяющие определять величину емкости конденсатора для ЭАД [6]. Однако они справедливы для двигателя, работающего с номинальными нагрузкой и частотой тока, не учитывают в явной форме изменения нагрузки, частоты питающего напряжения и состояния магнитной системы от подмагничивающего действия емкостного тока компенсационной обмотки. Эти зависимости не могут быть использованы без соответствующих доработок для управления величиной емкости конденсатора ЭАД, работающего с изменяющимися нагрузками и при частотном регулировании скорости вращения.

Задачей данного исследования является получение зависимости величины емкости компенсирующего конденсатора  $C_3$ , обеспечивающей желаемый коэффициент мощности ( $\cos\varphi_{ж}$ ) ЭАД в функции от других параметров его электрической схемы замещения.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поставленная задача решается при следующих условиях и допущениях: магнитная система двигателя ненасыщенная, электрическая схема замещения линейная, полезная мощность на валу двигателя  $P_{2ЭАД}$  равна полезной мощности двигателя  $P_{2ТАД}$ , параметры обмоток ротора ЭАД и ТАД одинаковые, параметры ветви намагничивания ЭАД определены с учетом подмагничивания магнитной системы емкостным током компенсационной обмотки по методике, изложенной в

[7]. Расчет емкости компенсирующего конденсатора осуществляется с учетом требований:

- 1) получение электродвигателя с коэффициентом мощности, равным желаемому или  $\cos\varphi=1,0$ ;
- 2) получение электродвигателя с КПД, большим или равным КПД реконструируемого двигателя,  $\eta_{ЭАД} \geq \eta_{ТАД}$ .

Методика расчета емкости компенсирующего конденсатора основана на решении уравнения, описывающего эквивалентную проводимость схемы замещения ЭАД (рис. 1) [7].

На рис. 1:  $R_1, X_1$  – активное и индуктивное сопротивление рабочей обмотки статора;  $R_m$  – активное сопротивление ветви намагничивания, пропорциональное потерям в стали магнитной системы;  $X_m$  – реактивное сопротивление ветви намагничивания, пропорциональное рабочему магнитному потоку двигателя;  $R_2', X_2'$  – активное и реактивное сопротивления обмотки ротора, приведенные к рабочей обмотке статора;  $R_n$  – сопротивление пропорциональное полезной мощности двигателя, определяемое известной формулой

$$R_n = R_2' \cdot \left( \frac{1}{s} - 1 \right), \text{ где } s \text{ – скольжение двигателя; } R_3',$$

$X_3'$  – активное и индуктивное сопротивления компенсационной обмотки, приведенные к рабочей обмотке статора;  $X_{C3}'$  – емкостное сопротивление компенсирующего конденсатора, приведенное к рабочей обмотке статора.

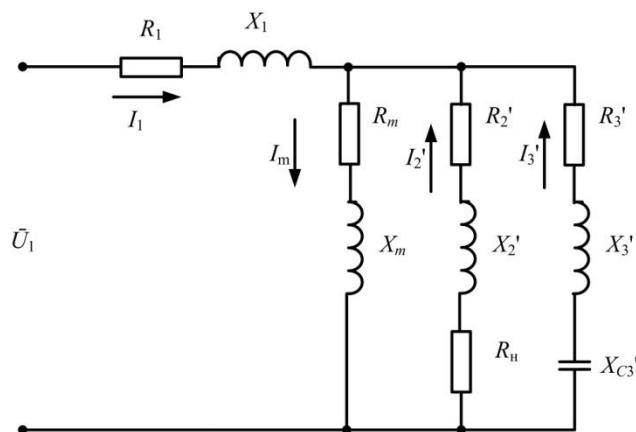


Рис. 1. Схема замещения ЭАД

Выразим полную эквивалентную проводимость схемы замещения ЭАД уравнением:

$$Y_3 = \frac{Y_1 \cdot (Y_m + Y'_2 + Y'_3)}{Y_1 + Y_m + Y'_2 + Y'_3} = \frac{Y_1 \cdot Y'_{m23}}{Y_1 + Y'_{m23}}, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} Y_1 &= g_1 - j \cdot b_1; Y'_2 = g'_2 - j \cdot b'_2; \\ Y'_3 &= g'_3 - j \cdot b'_3; Y_m = g_m - j \cdot b_m; \\ Y'_{m23} &= g'_{m23} - j \cdot b'_{m23}; g'_{m23} = g_m + g'_2 + g'_3; \\ b'_{m23} &= b_m + b'_2 + b'_3. \end{aligned} \quad (2)$$

После преобразований уравнение (1) с учетом (2) примет вид

$$Y_3 = \frac{(g_1 - j \cdot b_1) \cdot (g'_{m23} - j \cdot b'_{m23})}{g_1 + g'_{m23} - j \cdot (b_1 + b'_{m23})}, \quad (3)$$

где  $g_1, b_1$  – активная и реактивная проводимости рабочей обмотки;  $g_m, b_m$  – активная и реактивная проводимости ветви намагничивания;  $g'_2, b'_2$  – приведенные активная и реактивная проводимости обмотки ротора;  $g'_3, b'_3$  – приведенные активная и реактивная проводимости компенсационной обмотки и компенсирующего конденсатора.

Величины активных и реактивных проводимостей ветвей схемы замещения определяются по известным зависимостям, которые учитывают активные сопротивления, индуктивности, емкости и частоту питающего напряжения. Например, для третьей ветви схемы замещения ЭАД активная и реактивная проводимости, которые используются в решении данной задачи, определяются отношениями:

$$\begin{aligned} g'_3 &= \frac{R'_3}{Z_3'^2} = \frac{R'_3}{R_3'^2 + (X'_3 - X'_{c3})^2} = \\ &= \frac{R'_3}{R_3'^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L'_3 - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C'_3})^2}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} b'_3 &= \frac{X'_3 - X'_{c3}}{Z_3'^2} = \frac{X'_3 - X'_{c3}}{R_3'^2 + (X'_3 - X'_{c3})^2} = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L'_3 - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C'_3}}{R_3'^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L'_3 - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C'_3})^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $f$  – частота питающего напряжения, Гц;  $L'_3$  – приведенная индуктивность компенсационной обмотки, Гн;  $R'_3$  – приведенное активное сопротивление компенсационной обмотки, Ом;  $C'_3$  – приведенная емкость компенсирующего конденсатора, Ф.

Уравнение (3) после алгебраических преобразований примет вид

$$Y_3 = \frac{(g_1 g'_{m23} - b_1 b'_{m23}) - j \cdot (g_1 b'_{m23} + b_1 g'_{m23})}{(g_1 + g'_{m23})^2 + (b_1 + b'_{m23})^2} \times [(g_1 + g'_{m23}) + j \cdot (b_1 + b'_{m23})], \quad (6)$$

или

$$\begin{aligned} Y_3 &= \frac{(\tilde{A} - j \cdot \tilde{B}) \cdot (\tilde{C} + j \cdot \tilde{D})}{(\tilde{C} - j \tilde{D}) \cdot (C + j \tilde{D})} = \\ &= \frac{\tilde{A} \cdot \tilde{C} + \tilde{B} \cdot \tilde{D} - j \cdot (\tilde{B} \cdot \tilde{C} - \tilde{A} \cdot \tilde{D})}{\tilde{C}^2 + \tilde{D}^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\tilde{A} = g_1 \cdot g'_{m23} - b_1 \cdot b'_{m23}$ ;  $\tilde{B} = g_1 \cdot b'_{m23} + b_1 \cdot g'_{m23}$ ;  $\tilde{C} = g_1 + g'_{m23}$ ;  $\tilde{D} = b_1 + b'_{m23}$ .

Эквивалентную комплексную проводимость (7), с учетом принятых обозначений, запишем в алгебраической форме

$$\begin{aligned} Y_3 &= \frac{\tilde{A} \cdot \tilde{C} + \tilde{B} \cdot \tilde{D}}{\tilde{C}^2 + \tilde{D}^2} - \\ &- j \cdot \frac{(\tilde{B} \cdot \tilde{C} - \tilde{A} \cdot \tilde{D})}{\tilde{C}^2 + \tilde{D}^2} = g_3 - j \cdot b_3, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$g_3 = \frac{\tilde{A} \cdot \tilde{C} + \tilde{B} \cdot \tilde{D}}{\tilde{C}^2 + \tilde{D}^2}, \quad b_3 = \frac{(\tilde{B} \cdot \tilde{C} - \tilde{A} \cdot \tilde{D})}{\tilde{C}^2 + \tilde{D}^2}. \quad (9)$$

Для определения емкости компенсирующего конденсатора, обеспечивающего получение желаемого угла сдвига между питающим напряжением  $\dot{U}_1$  и током  $\dot{I}_1$  ЭАД, обратимся к выражению (8), определяющему полную проводимость схемы замещения ЭАД. Уравнение (8) можно представить графически – прямоугольным треугольником проводимости  $ABC$  (рис. 2), где  $AB - Y_{3ТАД}$ ;  $AC - g_{3ТАД}$ ;  $BC - b_{3ТАД}$ ;  $B'C - b_{3ж} = b_3$ ;  $AB' - Y_3 = Y_{ЭАД}$ .

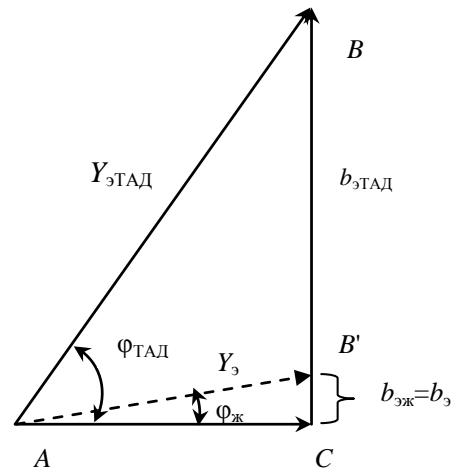


Рис. 2. Треугольник проводимости

При сохранении полезной мощности ЭАД, равной полезной мощности ТАД, т.е.  $P_{2ЭАД} = P_{2ТАД}$ , а также равенстве коэффициентов полезного действия двигателей  $\eta_{ЭАД} = \eta_{ТАД}$ , из треугольника  $ABC$  реактивную проводимость  $b_3$  ЭАД можно выразить произведением

$$b_3 = g_3 \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ж}, \quad (10)$$

которое, с учетом (8), (9), примет вид

$$\frac{(\tilde{B} \tilde{C} - \tilde{A} \tilde{D})}{\tilde{C}^2 + \tilde{D}^2} = \frac{\tilde{A} \cdot \tilde{C} + \tilde{B} \cdot \tilde{D}}{\tilde{C}^2 + \tilde{D}^2} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ж}. \quad (11)$$

Умножим правую и левую части уравнения (11)

на  $\tilde{C}^2 + \tilde{D}^2$ , получим

$$\tilde{B}\tilde{C} - \tilde{A}\tilde{D} = (\tilde{A}\tilde{C} + \tilde{B}\tilde{D}) \cdot \operatorname{tg}\varphi_{ж}. \quad (12)$$

Левую и правую части уравнения (12) выразим через параметры схемы замещения

$$\tilde{B}\tilde{C} - \tilde{A}\tilde{D} = (g_1 b'_{m23} + b_1 g'_{m23}) \cdot (g_1 + g'_{m23}) - (g_1 g'_{m23} - b_1 b'_{m23}) \cdot (b_1 + b'_{m23}); \quad (13)$$

$$\tilde{A}\tilde{C} + \tilde{B}\tilde{D} = (g_1 g'_{m23} - b_1 b'_{m23}) \cdot (g_1 + g'_{m23}) + (g_1 b'_{m23} + b_1 g'_{m23}) \cdot (b_1 + b'_{m23}). \quad (14)$$

В этих выражениях величины, содержащие параметры с индексом 3 (третьей ветви, см. рис. 1)  $g_3, b_3, g_{m23}, b_{m23}$ , несут в себе искомую величину емкостного сопротивления  $X'_{C3}$ , а следовательно, емкость конденсатора  $C'_3$ .

Выполним алгебраические преобразования выражений (13), (14) так, чтобы в них в явной форме присутствовало емкостное сопротивление  $X'_{C3}$ , получим:

$$\tilde{B}\tilde{C} - \tilde{A}\tilde{D} = A' X'^4_{C3} + B' X'^3_{C3} + C' X'^2_{C3} + D' X'_{C3} + E'; \quad (15)$$

$$\tilde{A}\tilde{C} + \tilde{B}\tilde{D} = A'' X'^4_{C3} + B'' X'^3_{C3} + C'' X'^2_{C3} + D'' X'_{C3} + E'', \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} A' &= K'; \\ K' &= g_1^2 \cdot b'_{m2} + b_1 \cdot g_{m2}^2 + b_1^2 \cdot b'_{m2} + b_1 \cdot b_{m2}^2; \\ B' &= -4 \cdot K' \cdot X'_3 - Z'; \\ C' &= 3 \cdot X_3 \cdot (2 \cdot K' \cdot X_3 + Z') + R_3 \cdot (2 \cdot K' \cdot R_3 + F') + b_1; \\ Z' &= g_1^2 + b_1^2 + 2 \cdot b_1 \cdot b'_{m2}; F' = 2 \cdot b_1 \cdot g'_{m2}; \\ D' &= -X_3 \cdot (4 \cdot K' \cdot (X_3^2 + R_3^2) + 2 \cdot R_3 \cdot F' + 3 \cdot Z' \cdot X_3 + 2 \cdot b_1) - Z' \cdot R_3^2; \\ E' &= (X_3'^2 + R_3'^2) \cdot (K' \cdot (X_3'^2 + R_3'^2) + F' \cdot R_3' + Z' \cdot X_3' + b_1); \\ A'' &= K''; B'' = -4 \cdot K'' \cdot X'_3 - Z''; \\ K'' &= g_1 \cdot g_{m2} \cdot g_{m21} - b_1 \cdot b_{m2} \cdot g_{m21} + g_1 \cdot b_{m2} \cdot b_{m21} + b_1 \cdot g_{m2} \cdot b_{m21}; \\ Z'' &= g_1 \cdot b_{m2} + g_1 \cdot b_{m21} + b_1 \cdot g_{m2} - b_1 \cdot g_{m21}; \\ C'' &= 3 \cdot X_3 \cdot (2 \cdot K'' \cdot X_3 + Z'') + R_3 \cdot (2 \cdot K'' \cdot R_3 + F'') + g_1; \\ F'' &= g_1 \cdot g_{m2} + g_1 \cdot g_{m21} - b_1 \cdot b_{m2} + b_1 \cdot b_{m21}; \\ D'' &= -X_3 \cdot (4 \cdot K'' \cdot (X_3^2 + R_3^2) + 2 \cdot R_3 \cdot F'' + 3 \cdot Z'' \cdot X_3 + 2 \cdot g_1) - Z'' \cdot R_3^2; \\ E'' &= (X_3'^2 + R_3'^2) \cdot (K'' \cdot (X_3'^2 + R_3'^2) + F'' \cdot R_3' + Z'' \cdot X_3' + g_1). \end{aligned}$$

Равенство (12) с учетом (15, 16) примет вид:

$$\begin{aligned} A' \cdot X'^4_{C3} + B' \cdot X'^3_{C3} + C' \cdot X'^2_{C3} + D' \cdot X'_{C3} + E' &= \\ = (A'' \cdot X'^4_{C3} + B'' \cdot X'^3_{C3} + C'' \cdot X'^2_{C3} + D'' \cdot X'_{C3} + E'') \cdot \operatorname{tg}\varphi_{ж}. \end{aligned} \quad (17)$$

Перенесем правую часть уравнения (17) в левую, сгруппируем коэффициенты, получим уравнение четвертой степени:

$$\begin{aligned} (A' - A'' \operatorname{tg}\varphi_{ж}) \cdot X'^4_{C3} + (B' - B'' \operatorname{tg}\varphi_{ж}) \cdot X'^3_{C3} + \\ + (C' - C'' \operatorname{tg}\varphi_{ж}) \cdot X'^2_{C3} + \\ + (D' - D'' \operatorname{tg}\varphi_{ж}) \cdot X'_{C3} + E' - E'' \operatorname{tg}\varphi_{ж} = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

которое представим в виде, удобном для решения методом Феррари:

$$AX'^4_{C3} + BX'^3_{C3} + CX'^2_{C3} + DX'_{C3} + E = 0, \quad (19)$$

где  $A = A' - A'' \operatorname{tg}\varphi_{ж}$ ;  $B = B' - B'' \operatorname{tg}\varphi_{ж}$ ;

$C = C' - C'' \operatorname{tg}\varphi_{ж}$ ;  $D = D' - D'' \operatorname{tg}\varphi_{ж}$ ;

$E = E' - E'' \operatorname{tg}\varphi_{ж}$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение уравнения (19) методом Феррари позволяет определить емкостное сопротивление компенсирующего конденсатора [8]

$$X'_{C3} = -\frac{B}{4A} + \frac{\pm_1 W \pm_2 \sqrt{-(3\alpha + 2y \pm_1 \frac{2\beta}{W})}}{2}. \quad (20)$$

В выражении (20) два  $\pm_1$  зависимы и должны иметь одинаковый знак,  $\pm_2$  – независим от  $\pm_1$  и может иметь любой знак. Исследование выражения (20) показало, что решение уравнения имеет физический смысл при положительных  $\pm_1$  и  $\pm_2$ . В уравнении (20):

$$\alpha = -\frac{3B^2}{8A^2} + \frac{C}{A}; \beta = -\frac{B^3}{8A^3} - \frac{BC}{2A^2} - \frac{D}{A};$$

$$\gamma = -\frac{3B^4}{256A^4} + \frac{CB^2}{16A^3} - \frac{BD}{4A^2} + \frac{E}{A};$$

$$P = -\frac{\alpha^2}{12} - \gamma; Q = -\frac{\alpha^3}{108} + \frac{\alpha\gamma}{3} - \frac{\beta^2}{8};$$

$$R = \frac{Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27}}; U = \sqrt[3]{R}; W = \sqrt{\alpha + 2y},$$

причем при  $U=0$   $y = -\frac{5\alpha}{6} - \sqrt[3]{P}$ ; при  $U \neq 0$ ,

$$y = -\frac{5\alpha}{6} - U + \frac{P}{3U}.$$

Приведенная и реальная емкости компенсирующего конденсатора, при найденном по (20)  $X'_{C3}$ , определяются выражениями:

$$C'_3 = \frac{1}{2\pi f X'_{C3}}; C_3 = \frac{C'_3}{K^2}, \quad (21)$$

где  $K$  – коэффициент трансформации между компенса-

ционной и рабочей обмотками, зависит от схем соединения обмоток статора и конденсаторов.

В отличие от известных зависимостей для расчета емкости компенсирующего конденсатора полученное выражение (20) позволяет определять ее с учетом желаемого коэффициента мощности и параметров компенсационной обмотки. Точность расчетов емкости компенсирующего конденсатора повышается на 5-7% по сравнению с известными зависимостями.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Получены зависимости (20), (21), позволяющие определять величину емкости компенсирующего конденсатора ЭАД для создания двигателя с желаемым коэффициентом мощности при известных параметрах схемы замещения ЭАД.

Перечисленными уравнениями можно воспользоваться для определения емкости компенсирующего конденсатора для создания двигателя с  $\cos\varphi=1,0$ . Для этого желаемый сдвиг фаз между напряжением и током необходимо принять равным нулю,  $\varphi_{ж}=0$ . При этом условия составляющие уравнения (19), содержащие  $\operatorname{tg}\varphi_{ж}$ , становятся равными нулю, емкость компенсирующего конденсатора определяется из условия  $b_3=0$ .

Разработанная зависимость положена в методику электромагнитного расчета ЭАД [9]. Она может использоваться также для определения величины емкости конденсатора при управлении коэффициентом мощности электроприводов, созданных на основе ЭАД, работающих с изменяющимися нагрузками и регулируемой частотой тока.

Для исследований и инженерных расчетов ЭАД разработаны математические описания, используемые в условиях проектных, электромашиностроительных и электроремонтных предприятий [10].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2112307 RU, МКИ 6 H02 к 17/28. Асинхронная компенсированная электрическая машина / Савицкий А.Л., Мугалимов Р.Г., Савицкая Л.Д. // Открытия. Изобретения.

1998. №15.

2. Опыт создания энергосберегающих электроприводов волочильных станков / Р.Г. Мугалимов, А.Р. Губайдуллин, С.В. Кретов, А.Р. Мугалимова // Промышленная энергетика. 2009. №7. С. 11-15.

3. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Губайдуллин А.Р. Экспериментальные исследования электроприводов волочильного стана на основе энергосберегающих асинхронных двигателей // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. №1. С. 43-47.

4. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Моделирование показателей энергоэффективности вариантов электроприводов промышленных установок на основе применения традиционных и компенсированных асинхронных двигателей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №2. С. 59-64.

5. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Мугалимова М.Р. Перспективы применения асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности в промышленных электроприводах // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2012. Вып. 6. С. 114-118.

6. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Определение емкости компенсирующего конденсатора асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып. 3. Ч. 4. С. 115-120.

7. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. 250 с.

8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970. 720 с.

9. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. К проектированию энергосберегающего асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые энергомеханические системы: труды III Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2007. С. 77-80.

10. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Технология реконструкции традиционных асинхронных двигателей на энергосберегающие варианты // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С.56-61.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### CAPACITANCE CALCULATION OF THE CAPACITOR FOR INDUCTION MOTORS WITH INDIVIDUAL REACTIVE POWER COMPENSATION

Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Kretov S.V., Gubaidullin A.R.

The article proposes method for capacitance calculation for energy efficient induction motor with individual reactive power compensation. In relation to the design of such an engine characteristics are developed allowing to calculate the capacity of the compensating capacitor with specified power factor measurements of the electrical machine. mathematical characteristics are given for different electromagnetic induction motor schemes with individual reactive power compensation.

**Keywords:** induction motor, reactive power, power factor, capacitor, electrical equivalent circuit, energy efficiency, mathematical characteristics.

#### REFERENCES

1. Mugalimov R. G. The patent 2112307 RU, MCI 6 H02 to 17/28. *Asinkhronnaya kompensirovannaya elektricheskaya mashina* [The asynchronous compensated electrical machine].

R.G. Mugalimov, A.L. Savitsky, L.D. Savitskaya. Opening. Inventions. 1998. No.15.

2. Mugalimov R.G., Gubaidullin A.R., Kretov S.V., Mugalimova A.R. Experience in creating energy-saving electric drives drawbenches. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2009, no.7, pp. 11-15.

3. Mugalimov R.G., Gubaidullin A.R., Mugalimova A.R. Electric drives on the basis of induction motors with individual reactive power compensation for drawing machines. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [News of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2009, no. 10, pp. 22-28.

4. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Modeling of energy efficiency variants electric industrial facilities based on the use of traditional and compensated induction motors. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical

University], 2011, no. 2, pp. 59-64.

5. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Mugalimova M.R. Prospects for the use induction motors with individual reactive power compensation in industrial motor drives. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Power University], 2012, issue 6, pp. 114-118.

6. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Definition of the capacity of the compensating capacitor induction motor with individual reactive power compensation. *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki* [Proceedings of the TulGU. Technical sciences], 2010, issue 3, part 4, pp. 115-120.

7. Mugalimov R.G. Induction motors with individual compensation of reactive power and electric drives based on them [Asinkhronnyye dvigateli s individual'noy kompensatsiyey reaktivnoy moshchnosti i elektroprivody na ikh osnove]. Magnitogorsk: NMSTU, 2011. 250 p.

8. Korn G., Korn T. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers [*Spravochnik po matematike dlja nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*]. Moscow: Nauka, 1970. 720 p.

9. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. For the design of energy-efficient induction motor with individual compensation of reactive power. *Elektromechanicheskie i elektromagnitnye preobrazovateli energii i upravlyaemie energomechanicheskie sistemy* [Electromechanical and electromagnetic energy converters the managed energy-mechanical systems]: proceedings of the III International Scientific and Technical Conference. Ekaterinburg: Ural State Technical University, 2007, pp. 77-80.

10. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Technology for reconstruction of traditional induction motors to energy saving variants. *Mashinostroenie* [Electronic Journal «Engineering»]. 2013, no.1, pp. 56-61.

УДК 621.31

Шохин В.В., Пермьякова О.В., Кисель Е.С.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ

Проводится моделирование электромеханической системы реверсивной клетки прокатного стана с учетом зазоров в механических передачах и упругих связей.

**Ключевые слова:** моделирование электропривода, прокатный стан, система автоматического регулирования скорости, структурная схема.

### ВВЕДЕНИЕ

Динамические режимы работы реверсивных клетей прокатных станов оказывают существенное влияние на надежность и долговечность электрического и механического оборудования, так как наличие зазоров и упругих связей в механических передачах приводит к появлению значительных динамических моментов. Проводится исследование работы реверсивной клетки листового стана горячей прокатки 2500 ОАО «ММК». Привод валков клетки индивидуальный. Каждый валок приводится во вращение двигателем постоянного тока, который питается от реверсивного тиристорного преобразователя. Система автоматического регулирования скорости (САРС) двухзонная с зависимым ослаблением поля в функции ЭДС якоря двигателя (рис. 1). САРС электроприводов нижнего и верхнего валков одинаковы.

Системы регулирования выполнены с использованием принципа подчиненного регулирования координат [1]. Настройка контуров регулирования проведена по модульному оптимуму, при этом в контурах скорости и ЭДС применены корректирующие устройства для сохранения настройки этих контуров неизменными при ослаблении потока возбуждения двигателя. В модели учтена нелинейность кривой намагничивания двигателя.

Передача крутящего момента на верхний валок осуществляется через вал, упругость которого учитывается при моделировании работы клетки [2]. Нижний валок связан с двигателем через редуктор, при этом также рассматриваются упругие свойства механической передачи. При моделировании учитываются возможные зазоры в элементах механических передач.

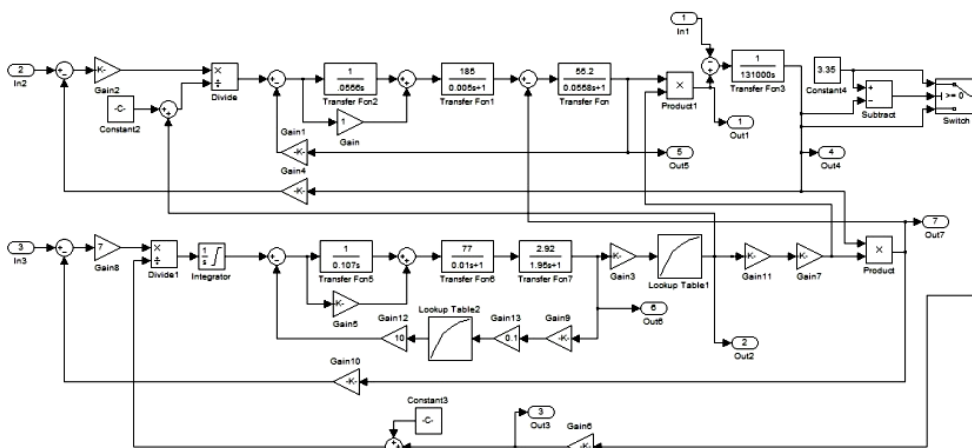


Рис. 1. Модель электропривода валка