

Косматов В.И., Сарваров А.С., Данилов Е.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ДВУМЯ ОБМОТКАМИ НА СТАТОРЕ

Обоснована актуальность проблемы повышения энергетических показателей нерегулируемого асинхронного электропривода при работе в режимах систематической недогрузки. Проанализированы основные пути решения проблемы, и в частности, акцентируется внимание на переход к статорным обмоткам новой конструкции в результате проведения ремонтных мероприятий. В этой связи отмечается интерес к реализации концепции энергосбережения в асинхронных электроприводах за счет применения индивидуальной компенсации при закладке в пазы ротора обмоток новой конструкции. Разработано математическое описание нагрузочных режимов асинхронных электроприводов с энергосберегающим двигателем с двумя обмотками на статоре. Рассматриваются два варианта: первый – между обмотками статора существует только электромагнитная связь; второй – между обмотками есть электромагнитная связь и электрическая через источники питания. На основе систем уравнений, составленных для исследуемых вариантов схем замещения АД с двумя обмотками на статоре, и их решения получены аналитические зависимости для расчета комплексов действующих значений фазных токов. Методом комплексных амплитуд и пространственных векторов (структурное моделирование) проведены исследования нагрузочных режимов электроприводов в статике и построена зависимость энергетического КПД для вариантов, когда существует только электромагнитная связь с компенсирующей обмоткой и когда наряду с электромагнитной связью осуществляется раздельное питание обмоток с различным фазовым сдвигом питающих напряжений источников. Установлено, что при наличии только электромагнитной связи достигается заметное повышение энергетического КПД. При осуществлении раздельного питания можно получить дополнительное незначительное повышение данного показателя (менее 0,5%) при определенных значениях фазового сдвига питающих напряжений. Полученный энергосберегающий эффект незначителен, что позволяет считать предпочтительным вариант, в котором реализована только электромагнитная связь.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, двухслойная обмотка, компенсирующая обмотка, электромагнитная связь, раздельное питание, схемы замещения, математическое описание, энергетический коэффициент полезного действия.

ВВЕДЕНИЕ

Электроприводы с асинхронными короткозамкнутыми двигателями широко применяются во многих отраслях промышленности, на транспорте, сельском хозяйстве и в быту ввиду известных существенных преимуществ по сравнению с другими типами двигателей.

Однако они имеют два серьезных недостатка:

1. Низкие регулировочные и пусковые показатели при питании от промышленной сети.
2. Относительно низкий коэффициент мощности ($\cos\varphi_H=0,7-0,9$) ввиду потребления из сети реактивной мощности, величина которой составляет 30-70% от полной мощности двигателя.

Дополнительным увеличением доли потребляемой электрической энергии из сети в асинхронных электроприводах является завышенная мощность электродвигателей, т.е. несоответствие их мощности потребностям технологического процесса [1]. Это приводит к значительному снижению электрического и энергетического КПД [2]. В частности [3], для двигателей мощностью 5 кВт при 50% нагрузке КПД = 55%, а для двигателей мощностью 150 кВт при 50% нагрузке КПД составляет 65%. Номинальное значение КПД для мощных двигателей находится на уровне 90% с небольшим превышением.

Недогрузка АД по мощности обусловлена в первую очередь тем, что значительная часть нерегулируемых электроприводов в промышленности вводилась в эксплуатацию в условиях, когда число типоразмеров массовых двигателей было крайне ограниченным, что

приводило к выбору двигателей при проектировании с явным завышением мощности (в ряде случаев до 40%) [4]. Известно, что средняя загрузка электродвигателя (отношение мощности, потребляемой рабочим органом машины, к номинальной мощности электродвигателя) в отечественной промышленности составляет 0,3-0,4 (в европейской практике эта величина составляет 0,6) [5]. Это значит, что традиционные АД работают с КПД значительно ниже номинального, и проблема повышения их энергетических показателей является актуальной.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время можно обозначить несколько путей решения проблемы повышения энергетической эффективности асинхронного электропривода:

1. Создание новых серий асинхронных электродвигателей высоких классов энергоэффективности. В мировой и отечественной практике данному направлению уделяется особое внимание [6].
2. Замена недогруженных электродвигателей на двигатели меньшей мощности.
3. В последние 15–20 лет в рамках концепции энергосбережения возрос интерес к созданию электроприводов на базе асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией на основе применения 2-слойных обмоток [7].

Массового перехода в промышленности на энергоэффективные двигатели в ближайшее время трудно ожидать в силу того, что процесс от их разработки до широкого применения часто затягивается на годы.

Принятие решения на замену недогруженного двигателя связано с оценкой капитальных затрат [3]. При

загрузке менее 45% однозначно необходимо проводить замену электродвигателя, а при загрузке 45–75% требуется проводить экономическую оценку мероприятия. При загрузке 70% и более замена нецелесообразна [3].

Технических проблем для перехода на 2-слойные обмотки в статоре не существует. При проведении ремонтов АД, связанных с заменой статорной обмотки, достаточно закладывать в пазы новые конструкции обмоток, в частности 2-слойные обмотки [4,6-12]. Общеизвестно, что существующий парк стандартных АД во многих отраслях промышленности проходит многократные ремонты с заменой статорной обмотки. Это обстоятельство позволяет ремонтным службам закладывать в пазы статора новые конструкции обмоток, как, например, наряду с основной – дополнительную обмотку для компенсации реактивной мощности [7-9], или совмещенную двухслойную обмотку [5,10-16]. Для недогруженных двигателей такая модернизация не будет ущербной, хотя отдельные специалисты высказывают сомнения, что из-за двух обмоток ухудшится использование сечения паза.

Совмещенные двухслойные обмотки по сути представляют собой две трехфазные обмотки статора, одна из которых соединена по схеме «треугольник», а другая – «звезда». Энергосберегающий эффект в таких двигателях достигается за счет заметного улучшения формы поля в воздушном зазоре. В стандартном двигателе поле имеет «условно синусоидальную» форму, а совмещенные обмотки позволяют создать практически синусоидальное распределение магнитной индукции в зазоре. Это достигается за счет того, что результирующее магнитное поле образуется путем суммирования результирующих векторов магнитной индукции полюсов одноименных фаз «треугольника» и «звезды», которые образуют между собой угол 30 эл. градусов.

В данной работе проводится исследование энергоэффективного двигателя с двумя обмотками на статоре с целью разработки методики расчета нагрузочных режимов и один из вариантов повышения $\cos \varphi$, основанный на создании энергосберегающего асинхронного двигателя (АД) с двумя обмотками на статоре. Новизной этой работы является разработка методики расчета нагрузочных режимов электропривода с АД с двумя обмотками на статоре с питанием их от одного или двух источников. Приводятся результаты исследований нагрузочных режимов и энергетических показателей рассматриваемых вариантов исполнения и питания обмоток АД.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическое описание стационарных режимов работы электропривода с двумя обмотками на статоре производится методом комплексных амплитуд [2].

Из многочисленных вариантов схем включения двухслойных обмоток статора предлагается рассмотреть следующие системы с двумя обмотками на статоре (рис. 1):

1) рабочая обмотка 1 включена на сеть с напряжением \dot{U}_1 , компенсационная обмотка 2 замкнута на конденсаторную батарею C ; в этом случае обмотки взаимосвязаны только электромагнитно (рис. 1, а);

2) обе обмотки питаются от сети, в общем случае с напряжениями $\dot{U}_1 = U_{1m} e^{j\omega t}$ и $\dot{U}_2 = U_{2m} e^{j\omega t + \gamma}$, где γ – угол сдвига векторов \dot{U}_1 и \dot{U}_2 ; в этом случае обмотки взаимосвязаны электрически через питающую сеть и электромагнитно (рис. 1, б).

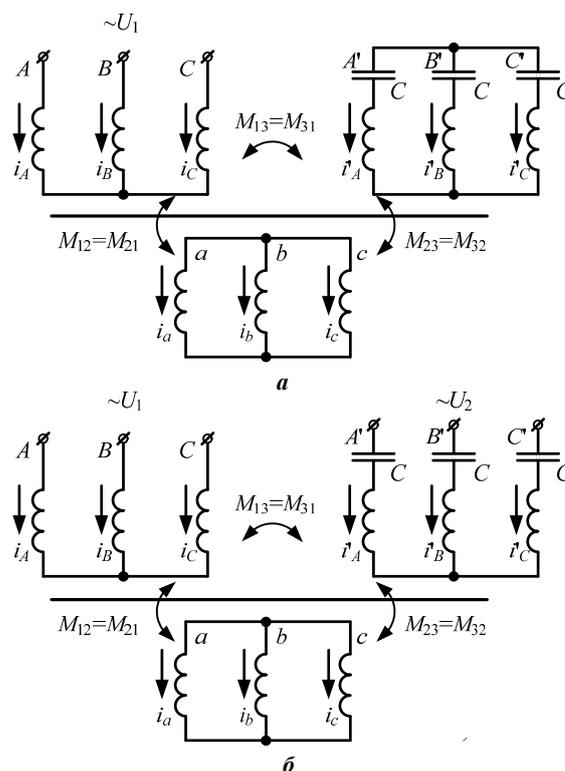


Рис. 1. Системы с двумя обмотками на статоре

Этим системам соответствуют электрические схемы замещения, представленные на рис. 2, а и б.

Математическое описание стационарного нагрузочного режима АД с двумя обмотками на статоре с учетом электромагнитных процессов по схемам рис. 1 и 2 в общем случае может быть представлено системой уравнений, записанных в комплексном виде [1]:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = (R_1 + jX_1)\dot{I}_1 + jX_m\dot{I}_2 + jX_m\dot{I}_3; \\ 0 = jX_m\dot{I}_1 + ((R_2/S) + jX_2)\dot{I}_2 + jX_m\dot{I}_3; \\ \dot{U}_2 = jX_m\dot{I}_1 + jX_m\dot{I}_2 + [R_3 + j(X_3 - X_C)]\dot{I}_3; \\ \dot{I}_m = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_1 + \dot{I}_3; \\ \dot{U}_1 = U_{1m} e^{j\omega t}; \\ \dot{U}_2 = U_{2m} e^{j\omega t + \gamma}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\dot{U}_1 = U_{1m} e^{j\omega t}$ – вектор фазного напряжения, приложенного к обмотке 1 статора (рис. 3); $\dot{U}_2 = U_{2m} e^{j\omega t + \gamma} = U_2(\cos\gamma + jsin\gamma)$ – вектор фазного напряжения, приложенного к обмотке 2 статора; U_1, U_2 – действующие значения фазных напряжений обмоток; $\gamma = 0 \div (\pm 180^\circ)$ – фазовый сдвиг вектора напряжения \dot{U}_2 относительно вектора \dot{U}_1 ; $\dot{I}_C = \dot{I}_1 + \dot{I}_3$ – суммарный ток статора; R_1, R_2, R_3 – активные сопротивления обмоток двигателя; $X_1 = 1,5X_{mf} + X_{16}$; $X_2 = 1,5X_{mf} + X_{26}$; $X_3 = 1,5X_{mf} + X_{36}$; $X_m = 1,5X_{mf}$; X_m – индуктивные сопротивления обмоток и намагничивающего контура двигателя; X_{mf} – индуктивное сопротивление намагничивающего контура фазы двигателя; X_C – сопротивление конденсаторной батареи фазы.

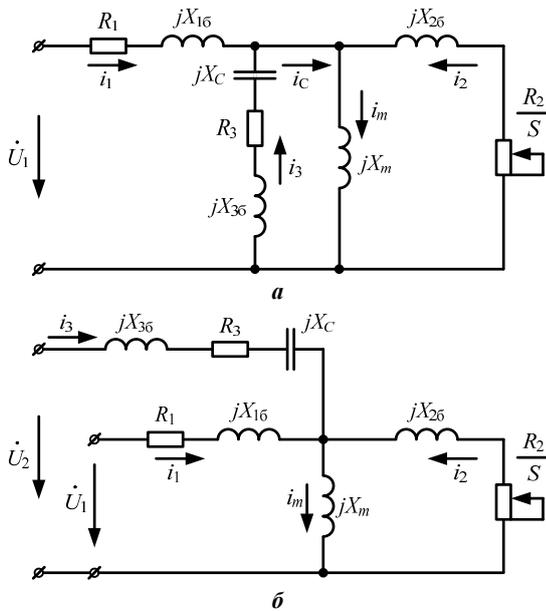


Рис. 2. Схемы замещения АД с двумя обмотками на статоре для вариантов систем: а – с электромагнитной связью; б – с электромагнитной связью и раздельным питанием обмоток статора

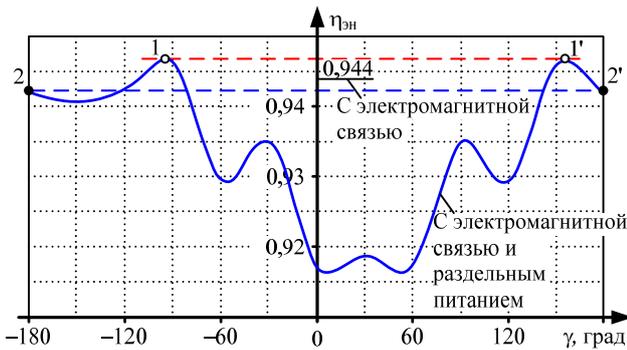


Рис. 3. Зависимость энергетического КПД от фазового сдвига векторов напряжения $\eta_{эн} = f(\gamma)$ (0,944 – значение $\eta_{эн}$ для АД с электромагнитной связью обмоток статора)

Для системы уравнений (1) матрица третьего порядка

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_1 + jX_1 & jX_m & jX_m \\ jX_m & (R_2/S) + jX_2 & jX_m \\ jX_m & jX_m & R_3 + j(X_3 - X_c) \end{vmatrix} \quad (2)$$

Определитель (детерминант) третьего порядка, соответствующий этой матрице, вычисляется по правилу

$$\Delta = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}$$

Решение матрицы после перемножения сомножителей и группировки слагаемых на вещественную и мнимую части имеет следующее выражение:

$$\Delta = (R_2/S) [R_1 R_3 - X_1(X_3 - X_c) + X_m^2] + R_1 [X_m^2 - X_2(X_3 - X_c)] + R_3 (X_m^2 - X_1 X_2) + R_3 (X_m^2 - X_1 X_2) + j \{ (R_2/S) [R_1 (X_3 - X_c) + R_3 X_1] + X_m^2 [X_1 + X_2 + (X_3 - X_c) - 2X_m^3 + R_1 R_3 X_2 - X_1 X_2 (X_3 - X_c)] \} \quad (3)$$

При $\Delta = \det A \neq 0$ решение системы уравнений (1) единственно и находится по формулам Крамера: $X_i = \Delta_i / \Delta$, $i = 1, 2, 3$. В них определитель Δ_i называется определителем неизвестного X_i и получается из определителя A заменой i -го столбца столбцом свободных членов.

Для тока I_1

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \dot{U}_1 & jX_m & jX_m \\ 0 & (R_2/S) + jX_2 & jX_m \\ \dot{U}_2 & jX_m & R_3 + j(X_3 - X_c) \end{vmatrix} = U_1 \{ (R_2/S) R_3 + X_m^2 - X_m (X_3 - X_c) + j [R_3 X_m + (R_2/S) (X_3 - X_c)] \} + \dot{U}_2 (X_m^2 - j(R_2/S) X_m) \quad (4)$$

Для тока I_2

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} R_1 + jX_1 & \dot{U}_1 & jX_m \\ jX_m & 0 & jX_m \\ jX_m & \dot{U}_2 & R_3 + j(X_3 - X_c) \end{vmatrix} = \dot{U}_1 [X_m (X_3 - X_c) - X_m^2 - jR_3 X_m] + \dot{U}_2 [X_m^2 + X_1 X_m - jR_1 X_m] \quad (5)$$

Для тока I_3

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} R_1 + jX_1 & jX_m & \dot{U}_1 \\ jX_m & (R_2/S) + jX_2 & 0 \\ jX_m & jX_m & \dot{U}_2 \end{vmatrix} = \dot{U}_1 [X_m (X_2 - X_m) - j(R_2/S) X_m] + \dot{U}_2 [(X_m^2 - X_1 X_2 + (R_2/S) R_1) + j((R_2/S) X_1 + R_1 X_1)] \quad (6)$$

Как следует из формул (4), (5), (6), токи в обмотках двигателя имеют две составляющие: одна от действия источника напряжения \dot{U}_1 , другая – от $\dot{U}_2 = U_2 (\cos \gamma + j \sin \gamma)$. После подстановки значения \dot{U}_2 в формулы (4), (5), (6), имеем следующие выражения для определителей $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$:

$$\begin{aligned} \Delta_1 = & \dot{U}_1 \left\{ (R_2 / S) R_3 - X_m^2 - X_m (X_3 - X_c) + \right. \\ & \left. + j \left[R_3 X_m + (R_2 / S) (X_3 - X_c) \right] \right\} + \\ & + \dot{U}_2 \left[(X_m^2 \cos \gamma + (R_2 / S) X_m \sin \gamma) + \right. \\ & \left. + j (X_m^2 \sin \gamma - (R_2 / S) X_m \cos \gamma) \right]; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 = & \dot{U}_1 \left\{ [(X_m (X_3 - X_c) - X_m^2) - j R_3 X_m] + \right. \\ & \left. + \dot{U}_2 \left\{ [(X_m^2 + X_1 X_m) \cos \gamma + R_1 X_m \sin \gamma] + \right. \right. \\ & \left. \left. + j [(X_m^2 + X_1 X_m) \sin \gamma - R_1 X_m \cos \gamma] \right\} \right\}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta_3 = & \dot{U}_1 \left\{ [X_m (X_2 - X_m)] - (j (R_2 / S) X_m) \right\} + \\ & + \dot{U}_2 \left\{ [(X_m^2 - X_1 X_2 + (R_2 / S) R_1) \cos \gamma - \right. \\ & \left. - ((R_2 / S) X_1) + R_1 X_2) \sin \gamma] + \right. \\ & \left. + j [(X_m^2 - X_1 X_2 + (R_2 / S) R_1) \sin \gamma + \right. \\ & \left. + ((R_2 / S) X_1 + R_1 X_2) \cos \gamma] \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Обозначая коэффициентами вещественные и мнимые части в формулах (3), (7), (8), (9) последовательно через $a_1, a_2, a_3, a_3', a_4, a_4', a_5, a_5', a_6, a_6', a_7, a_7', a_8, a_8'$, составим окончательные формулы для расчетов токов $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_c, \dot{I}_m$

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 = & \frac{\Delta_1}{\Delta} = \dot{U}_1 \left[\frac{a_1 a_3 + a_2 a_4}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_4 - a_2 a_3}{a_1^2 + a_2^2} \right] + \\ & + \dot{U}_2 \left[\frac{a_1 a_3' + a_2 a_4'}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_4' - a_2 a_3'}{a_1^2 + a_2^2} \right]; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 = & \frac{\Delta_2}{\Delta} = \dot{U}_1 \left[\frac{a_1 a_5 + a_2 a_6}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_6 - a_2 a_5}{a_1^2 + a_2^2} \right] + \\ & + \dot{U}_2 \left[\frac{a_1 a_5' + a_2 a_6'}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_6' - a_2 a_5'}{a_1^2 + a_2^2} \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_3 = & \frac{\Delta_3}{\Delta} = \dot{U}_1 \left[\frac{a_1 a_7 + a_2 a_8}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_8 - a_2 a_7}{a_1^2 + a_2^2} \right] + \\ & + \dot{U}_2 \left[\frac{a_1 a_7' + a_2 a_8'}{a_1^2 + a_2^2} + j \frac{a_1 a_8' - a_2 a_7'}{a_1^2 + a_2^2} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Для энергосберегающего АД, реконструированного на основе двигателя 4А225М4У3 со следующими параметрами: $P_n = 55$ кВт, $U_{нф} = 220$ В, $I_n = 100,1$ А, $f_{нф} = 50$ Гц, $\omega_0 = 157,1$ 1/с, $X_m = 20,57$ Ом, $X_1 = 20,67$ Ом, $X_2 = 20,73$ Ом, $X_3 = 20,65$ Ом, $R_1 = 0,055$ Ом, $R_2 = 0,065$ Ом, $R_3 = 0,046$ Ом, $S_n = 0,0274$, $M_n = 360$ Нм (параметры двигателя приведены в обмотке статора), произведены расчеты действующих значений токов $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_c, \dot{I}_m$, КПД $\eta = P_2 / P_c \cdot \cos \varphi_c$, энергетический КПД $\eta_{эн} = \eta \cos \varphi_c$ для схем **рис. 1, 2** при $X_c = 10$ Ом ($C = 319$ мкФ) и различных фазовых сдвигах векторов напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 . Значения величины скольжения взяты из материалов исследования динамических режимов энергосберегающего АД [2].

Результаты расчетов представлены в виде графика зависимости энергетического КПД $\eta_{эн} = f(\gamma)$, которая представлена на **рис. 3**. Здесь же показано значение $\eta_{эн}$ для нагрузочного режима энергосберегающего АД только с электромагнитной связью обмоток статора. Его значение составляет 0,944.

Для сопоставления следует отметить, что энергетический КПД базового двигателя до реконструкции имел значение $\eta_{энн} = \eta_n \cos \varphi_n = 0,925 \cdot 0,9 = 0,833$. Откуда видно, что реконструкция двигателя позволила на 11% повысить энергетический КПД двигателя.

Для случая отдельного питания обмоток статора в экстремальных точках 1 и 1' энергетический КПД имеет незначительное превышение. Точки 2 и 2' на **рис. 3** соответствуют подаче напряжения U_2 на компенсирующую обмотку в противофазе напряжению U_1 . Откуда видно, что питание компенсирующей обмотки от сети не дает дополнительного эффекта.

Выводы

1. Разработано математическое описание стационарного режима энергосберегающего АД с двумя обмотками на статоре и питанием от источников напряжения с фазовым сдвигом векторов \dot{U}_1, \dot{U}_2 с электрической и электромагнитной связью этих обмоток, позволяющее производить расчеты показателей энергетической эффективности различных систем АД с совмещенными обмотками.

2. Расчеты нагрузочных режимов доказали, что энергетические показатели энергосберегающего АД с двумя обмотками на статоре и питанием их от двух источников $\dot{U}_1 = U_{1m} e^{j\theta}$ и $\dot{U}_2 = U_{2m} e^{j\gamma}$ зависят от фазового сдвига векторов γ . Энергетический КПД $\eta_{эн} = \eta \cos \varphi_c$ является сложной функцией фазового сдвига векторов напряжения, а его значения меняются в пределах от 0,917 ($\gamma = 0$) до 0,946 ($\gamma = 150^\circ$).

3. Наиболее экономичный режим энергосберегающего АД достигается в варианте системы при наличии только электромагнитной связи обмоток. Для исследуемого двигателя при емкости конденсаторной батареи $C = 319$ мкФ ($X_c = 10$ Ом энергетический КПД оценивается величиной $\eta_{эн} = 0,944$, что на 11% превышает номинальное значение (**рис. 3**).

4. Система с электромагнитной связью и отдельным питанием обмоток с регулированием фазового сдвига между напряжениями \dot{U}_1 и \dot{U}_2 не дает заметного эффекта в повышении энергетического КПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный электропривод / под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. М.: Энергоатомиздат, 1990, 544 с.: ил.
2. Мугалимов Р.Г., Косматов В.И., Мугалимова А.Р. Математическое описание электропривода на основе энергосберегающего асинхронного двигателя с индивидуальной компенсирующей реактивной мощности // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал (Russian Internet Journal of Industrial Engineering). 2013. №2. С. 78–89.
3. Никифоров Г.В. Энерго- и ресурсосбережение – основные направления развития электроприводов ОАО «ММК» в условиях рыночной экономики // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004, Магнитогорск, 14–17 сентября 2004 г.) Ч. I. Магнитогорск, 2004. С. 5–8.

4. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Проблемы и перспективы развития электропривода // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Т. 1. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 5–9.
5. Дуюнов Д.А. Асинхронный двигатель с совмещенными обмотками // Энергосовет. 2013. №2(27). С.19–25.
6. Разработка и освоение асинхронных электродвигателей АЭД энергоэффективности 7AVE: некоторые итоги и дальнейшие задачи / В.Я. Беспалов, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров // Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2012. С. 13-16.
7. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 250 с.
8. Пат. 2112307 RU, МКИ 6 H02 K 17/28. Асинхронная компенсированная электрическая машина / Р.Г. Мугалимов, А.Л. Савицкий, Л.Д. Савицкая // Открытия. Изобретения. 2009. №15.
9. Мугалимов Р.Г. Концепция повышения энергоэффективности асинхронных двигателей и электроприводов на их основе // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №1. С. 59-63.
10. Мухаматшин А.И., Корнилов В.Ю. Метод контроля энергетических характеристик электропривода на базе асинхронного электродвигателя с комбинированной двухслойной обмоткой // Труды IX Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. 2016. С.77–80.
11. Холбаев Д.Ж., Файзуллаев К.М. Энергосбережение при внедрении в производство асинхронных двигателей с совмещенными обмотками (АДСО) // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2016. URL: <https://online-electric.ru/articles.php?id=152>
12. Лесков И.А., Троценко В.М., Калимуллин А.Т. Новые разработки в плане энергоэффективности асинхронных двигателей. Экономический расчет асинхронного двигателя с совмещенной обмоткой // Естественные и технические науки. 2015. №2.
13. Yuji O., Kazuto Sakai. Permanent Magnet Motor Capable of Changing the Number of Poles by a Factor of Three // International Conference on Electrical Machines and Systems. 2013. Busan, Korea. P. 1122-1126.
14. William R., William Finley, Mark Hodowanec, Warren Holter. Diagnosing motor vibration problems // Conference Record of 2000 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. 2000. 19-23. P. 165-180.
15. Bose B. Modern Power Electronics and AC Drives. Beijing, China Machine Press, 2003.
16. Hao Z., Rong-xiang Zhao, Huan Yang, Hui Cai. A Vibration Mitigation Approach for Inverter-fed Permanent Magnet Motor Drive System // IEEE SENSORS JOURNAL. 2009. P. 2017-2022.

Поступила в редакцию 01 марта 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INVESTIGATION OF THE OPERATING MODES OF ELECTRIC DRIVES WITH AN INDUCTION MOTOR WITH TWO STATOR WINDINGS

Valeriy I. Kosmatov

Ph.D. (Eng.), Professor, the Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Anvar S. Sarvarov

Ph.D. (Eng.), Professor, the Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: anvar@magtu.ru.

Egor I. Danilov

Master's degree student, the Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The authors demonstrated the importance of the problem of improving the energy characteristics of the constant speed induction electric drive when it operates in the modes of systematic underload. The main solutions to the problem were analyzed, in particular, the attention was paid to the transfer to stator windings of new design as a result of repair operations. Thus, it is noted that it is of special interest to implement the concept of energy saving in induction electric drives due to application of individual compensation when windings of new design are placed in the rotor slots. Mathematical description of load modes was developed for induction electric drives with an energy saving motor with two stator windings. Two variants of design are considered, the first one, where only electromagnetic link is provided between the stator windings, and the second one providing both electromagnetic and electric connection through the power source between the windings. A set of equations made for the investigated variants of replacement induction motors with the one with two stator windings and the solution of these equations were used to obtain analytic dependences, which make it possible to calculate the actual

values of phase currents. Complex amplitude method and the method of space vectors (structure modeling) were used to study the load modes of electric drives in static and the dependence of energy efficiency was developed for the variant where only electromagnetic connection with the compensating winding is provided and for the variant where both electromagnetic connection and separate power supply of windings is provided from power sources. It was found that when only electromagnetic connection is provided, significant improvement of energy efficiency is achieved. When separate power supply is provided, one can obtain additional insignificant improvement of this characteristic (less than 0.5%) for certain values of phase shift of supply voltages. The obtained energy saving effect is insignificant, thus, it is believed that the variant of design with the electromagnetic connection only is more preferable.

Keywords: induction motor, double-layer winding, compensating winding, electromagnetic connection, separate power supply, equivalent circuits, mathematical description, energy efficiency.

REFERENCES

1. *Avtomatizirovannyi electropriwod* [Automatic electric drive]. Ed/ N.F. Ilyinskiy, M.G. Yunkov. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 544 p. (In Russian)
2. Mugalimov R.G., Kosmatov V.I., Mugalimova A.R. Mathematical description of electric drive based on an energy saving induction motor with individual compensation of reactive power. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 78-89. (In Russian)
3. Nikiforov G.V. Energy and resource saving as the main fields of electric drive development at OJSC MMK in the market economy. *Trudy IV Mezhdunarodnoy (XV Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu «Avtomatizirovannyi elektroprivod v XXI veke: puti razvitiya»* [Papers of IV International (XV All-Russian) conference on automatic electric drive "Automatic electric drive in the XXI century: development trends"] (AEP-2004, Magnitogorsk, September 14-17, 2004). Part I. Magnitogorsk, 2004, pp. 5-8. (In Russian)
4. Onischenko G.B., Yunkov M.G. Problems and development prospects of electric drive. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Papers of VIII International (XIX All-Russian) conference on electric drive AEP-2014]. Vol. 1. Saransk: Publishing center of Mordoviya University, 2014, pp. 5-9. (In Russian)
5. Duyunov D.A. Induction motor with combined windings. *Energosovet* [Energy council], 2013, no. 2(27), pp.19-25. (In Russian)
6. Bepalov V.Ya., Kobelev A.S., Kruglikov O.V., Makarov L.N. Design and application of induction motors AED of 7AVE energy efficiency class: results and further tasks. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Papers of International (XIII All-Russian) scientific conference on automatic electric drive]: Ivanovo Lenin State Power University». Ivanovo, 2012, pp. 13-16. (In Russian)
7. Mugalimov R.G. *Asinkhronnye dvigateli s individualnoy kompensatsiyey reaktivnoy moshnosti i elektroprivody na ikh osnove* [Induction motors with individual compensation of reactive power and electric drives based on them]. Magnitogorsk: Pub. Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011. 250 p. (In Russian)
8. Mugalimov R.G., Savitskiy A.L., Savitskaya L.D. *Asinkhronnaya kompensirovannaya elektricheskaya mashina* [Induction compensated electrical machine]. Patent RF, no. 2112307, 2009.
9. Mugalimov R.G. Improvement of energy efficiency of induction motors and electric drives based on them. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 1, pp. 59-63. (In Russian)
10. Mukhametshin A.I., Kornilov V.Yu. Method of control of energy characteristics of the electric drive based on an induction electric drive with combined two-layer winding. *Trudy IX Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016* [Papers of IX International (XX All-Russian) scientific conference on automatic electric drive AEP-2016]. 2016, pp. 77-80. (In Russian)
11. Kholbaev D.Zh., Faizullaev K.M. Energy saving during introduction of induction motors with combined windings. On-line electrician: Electrical engineering. New technology, 2016. URL: <https://online-electric.ru/articles.php?id=152> (In Russian)
12. Leskov I.A., Trotsenko V.M., Kalimullin A.T. Recent developments in the field of energy efficiency of induction motors. Economic design of an induction motor with combined winding. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Electronic scientific journal "Natural and technical sciences"]. 2015, no. 2. (In Russian)
13. Yuji O., Kazuto Sakai. Permanent Magnet Motor Capable of Changing the Number of Poles by a Factor of Three. International Conference on Electrical Machines and Systems. 2013. Busan, Korea. pp. 1122-1126.
14. William R., William Finley, Mark Hodowanec, Warren Holter. Diagnosing motor vibration problems. Conference Record of 2000 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. 2000, 19-23, pp. 165-180.
15. Bose B. Modern Power Electronics and AC Drives. Beijing, China Machine Press, 2003.
16. Hao Z., Rong-xiang Zhao, Huan Yang, Hui Cai. A Vibration Mitigation Approach for Inverter-fed Permanent Magnet Motor Drive System. IEEE SENSORS JOURNAL. 2009, pp. 2017-2022.

Косматов В.И., Сарваров А.С., Данилов Е.И. Исследование нагрузочных режимов электроприводов с асинхронным двигателем с двумя обмотками на статоре // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 12-17. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-12-17](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-12-17)

Kosmatov V.I., Sarvarov A.S., Danilov E.I. Investigation of the Operating Modes of Electric Drives with an Induction Motor with Two Stator Windings. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 12-17. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-12-17](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-12-17)