

УДК 621.313.333

В.Ф. Сивокобыленко, д-р техн. наук, проф.,  
С.В. Василец, канд. техн. наук

Государственное высшее учебное заведение „Донецкий национальный технический университет“, г.Донецк, Украина, e-mail: svf@elf.dgtu.donetsk.ua

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

V.F. Sivokobylenko, Dr. Sci. (Tech.), Professor  
S.V. Vasylets, Cand. Sci. (Tech.)

State Higher Educational Institution “Donetsk National Technical University”, Donetsk, Ukraine, e-mail: svf@elf.dgtu.donetsk.ua

## DESIGN-EXPERIMENTAL ESTIMATION OF INDUCTION MOTORS EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS AND CHARACTERISTICS

**Цель.** Разработка метода, позволяющего по данным эксплуатационных режимов пуска и работы под нагрузкой асинхронного электродвигателя определить параметры схемы замещения, которая учитывает потери в стали и влияние эффекта вытеснения тока в роторе, а также алгоритма расчета по найденным параметрам двигателя установившихся и переходных режимов работы привода.

**Методика.** Включает определение параметров статорной цепи, вычисление, по данным двух опытов с различными коэффициентами загрузки механизма, входных активного и индуктивного сопротивлений двигателя. Определяются разности проводимостей роторных цепей для двух опытов загрузки, отношение которых позволяет составить квадратное уравнение, и из его решения найти постоянную времени и параметры ротора для области рабочих скольжений. Затем вычисляются параметры контура потерь в стали и индуктивного сопротивления взаимной индукции, а также эквивалентного двухклеточного ротора с независимыми от скольжения параметрами. Статические характеристики двигателя могут быть получены на основе расчетов непосредственно по схеме замещения. Для расчета динамических характеристик двигателя составлены дифференциальные уравнения в неподвижной относительно статора системе координат.

**Результаты.** Разработан метод экспериментального определения параметров Т-образной схемы замещения асинхронного электропривода, отличающийся простотой реализации, так как не требует специализированного оборудования и проведения опыта холостого хода, а использует данные из нормальных эксплуатационных режимов работы привода под нагрузкой и в режиме пуска. Показано, что по данным двух опытов загрузки при различных скольжениях могут быть определены параметры ветви намагничивания для учета потерь в стали, ток холостого хода, номинальное скольжение, а также значения параметров ротора в области номинальных скольжений. Приведен способ учета влияния вытеснения тока на параметры ротора путем представления его в виде двух параллельно включенных клеток, параметры которых находят по значениям входных сопротивлений в опытах загрузки и в режиме пуска при единичном скольжении.

**Научная новизна.** Показано, что на основе измерения параметров пускового и нагрузочных режимов представляется возможным определить потери, ток холостого хода и номинальное скольжение асинхронного двигателя, а также параметры контуров ротора, которые учитывают эффект вытеснения тока, что позволяет уточнить каталожные данные.

**Практическая значимость.** Состоит в снижении затрат на определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по причине уменьшения количества требуемых опытов.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, схема замещения, параметры, уравнение, сопротивление, индуктивность, вытеснение тока, потери в стали

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с научными и практическими задачами.** В настоящее время происходит интенсивное внедрение современного автоматизированного электропривода, частотного и плавного пуска асинхронных двигателей (АД) большой мощности, устройств быстрого переключения питания группы двигателей на резервный источник. Разработка рекомендаций по повышению надежности работы таких двигателей возможна

путем глубоких исследований переходных процессов при пуске, торможении, повторном включении, коротких замыканиях и т.д., что требует знания адекватных параметров схем замещения асинхронных машин. Кроме того, настройка систем автоматического управления частотно-регулируемых асинхронных электроприводов требует знания параметров схем замещения АД.

**Анализ исследований и публикаций.** Известны методы идентификации параметров асинхронного двигателя, основанные на использовании данных опытов холостого хода и короткого замыкания [1, 2].

Однако проведение опыта холостого хода в промышленных условиях затруднительно из-за необходимости отсоединения двигателя от механизма или применения вспомогательного привода. Методы, требующие проведения опытов при вынужтом роторе, в условиях эксплуатации трудно реализуемы. Использование каталожных данных [3, 4] из-за их недостоверности может приводить к недопустимым погрешностям.

Общую индуктивность рассеяния асинхронного двигателя возможно определить с использованием некоторых паспортных данных и мгновенных значений реактивной мощности на основании комплексных векторов напряжений и токов двигателя, причем частота вращения рассчитывается косвенно по частоте пазовой гармоники [5]. Однако такой метод не позволяет учесть потери в стали и вытеснение тока в роторе.

Методы, основанные на использовании источника переменной частоты, как это справедливо указано в [6], не позволяют определить параметры Т-образной схемы замещения, и требуют принятия дополнительных соотношений между индуктивными сопротивлениями рассеяния статора и ротора.

Методам экспериментального определения параметров широкополосных АД посвящены работы [3, 7], где сопротивления ротора получают нелинейные зависимости от скольжения. Однако использование таких параметров для анализа динамических характеристик сопряжено с погрешностями [8].

Учет потерь в стали в схеме замещения позволяет повысить ее достоверность [9], что, однако, требует дополнительных методов их учета.

**Нерешенная часть общей проблемы.** Многие АД, используемые в промышленности, выполняются с широкополосным или двухклеточным ротором, что улучшает их пусковые характеристики. Однако параметры таких двигателей нелинейны из-за вытеснения тока в роторе, что необходимо учитывать при определении параметров схем замещения АД. Углубленный анализ переходных процессов в двигателе, разработка перспективных систем частотного управления АД, обоснование структуры и параметров новых микропроцессорных защит для двигателей требуют уточнения методики расчета параметров схем замещения как двигателей общепромышленного исполнения, так и широкополосных.

**Постановка задачи.** Разработка метода, позволяющего по данным эксплуатационных режимов пуска и работы под нагрузкой асинхронного электродвигателя определить параметры схемы замещения, которая учитывает потери в стали и влияние эффекта вытеснения тока в роторе, а также алгоритма расчета по найденным параметрам двигателя установившихся и переходных режимов работы привода.

**Основной материал и результаты исследований.** Примем за основу схему замещения асинхронного двигателя (рис. 1), которая состоит из активных и индуктивных сопротивлений рассеяния: статорной цепи  $R_s, X_s$ ; двух параллельно включенных для учета

эффекта вытеснения тока контуров ротора  $R_{k1}, X_{k1}$  и  $R_{k2}, X_{k2}$ ; контура потерь в стали  $R_{fe}, X_{fe}$  и индуктивного сопротивления взаимной индуктивности всех контуров  $X_m$ . Будем считать, что насыщение по главному магнитному пути и по путям потоков рассеяния отсутствует, сопротивления обмоток статора и ротора пофазно одинаковы, индукция в воздушном зазоре распределена синусоидально. Все величины будем приводить в общепринятых относительных единицах. Для учета потерь в магнитопроводе в схеме замещения (рис. 1) выделен контур потерь в стали, соотношение между сопротивлениями  $R_{fe}, X_{fe}$  которого, по данным проф. Неймана Л.Р. [10], можно учесть с помощью коэффициента  $k_{fe} = (0,5 \div 0,7)$ , т.е.  $X_{fe} = k_{fe} \cdot R_{fe}$ .

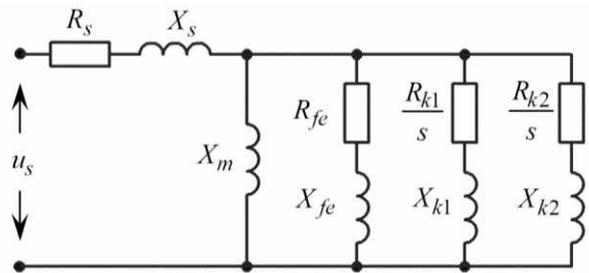


Рис. 1. Схема замещения асинхронного двигателя

Активное сопротивление статорной цепи на постоянном токе  $R_s$  можно измерить на отключенной от сети машине. Для определения индуктивного сопротивления рассеяния статора  $X_s$  отсутствуют опыты, не требующие разборки машины, в связи с чем примем, согласно рекомендациям многих авторов [3, 6, 8, 9], приблизительное равенство индуктивных сопротивлений рассеяния статора и ротора. В данной работе для этой цели используются экспериментальные значения кратности пускового тока статора  $k_i$  при скольжении  $s=1$

$$X_s = 0,5 \cdot k_i^{-1}.$$

Покажем возможность определения параметров ветви намагничивания и обмотки ротора в области рабочих скольжений из двух опытов нагрузки с различными коэффициентами загрузки механизма. В опытах измеряют напряжения, токи статора, потребляемую активную мощность, скольжение. По этим данным определяются входные (активное  $R_{vx}(s_i)$  и индуктивное  $X_{vx}(s_i)$ ) сопротивления двигателя, после чего, путем вычитания из последних соответствующих сопротивлений статора, можно найти активные  $G_{rm}(s_i)$  и реактивные  $B_{rm}(s_i)$  проводимости, которые состоят из параллельно включенных проводимостей ветви намагничивания  $B_m$ , контура потерь в стали  $G_{fe}, B_{fe}$  и контуров ротора  $G_{r0}(s_i), B_{r0}(s_i)$

$$G_{rm}(s_i) = \frac{R_{vx}(s_i) - R_s}{[R_{vx}(s_i) - R_s]^2 + [X_{vx}(s_i) - X_s]^2} = G_{fe} + G_{r0}(s_i); \quad (1)$$

$$B_{rm}(s_i) = \frac{X_{vx}(s_i) - X_s}{[R_{vx}(s_i) - R_s]^2 + [X_{vx}(s_i) - X_s]^2} = B_{fe} + B_m + B_{r0}(s_i). \quad (2)$$

Вычислим проводимости  $\Delta G_{r0}$  и  $\Delta B_{r0}$  как разности соответствующих проводимостей (1) и (2), полученные в двух опытах нагрузки при скольжениях  $s_1$  и  $s_2$ , которые будут равны разностям проводимостей роторной цепи

$$\Delta G_{r0} = G_{rm}(s_1) - G_{rm}(s_2) = G_{r0}(s_1) - G_{r0}(s_2);$$

$$\Delta B_{r0} = B_{rm}(s_1) - B_{rm}(s_2) = B_{r0}(s_1) - B_{r0}(s_2).$$

С другой стороны, эти разности проводимостей можно выразить через искомые сопротивления ротора  $R_{r0}$  и  $X_{r0}$ , которые в областях скольжений, меньших критического, можно считать постоянными и не зависящими от эффекта вытеснения токов в роторе. Эти сопротивления можно определить из решения приведенных ниже уравнений

$$\Delta G_{r0} = \frac{R_{r0} \cdot s_1^{-1}}{(R_{r0} \cdot s_1^{-1})^2 + X_{r0}^2} - \frac{R_{r0} \cdot s_2^{-1}}{(R_{r0} \cdot s_2^{-1})^2 + X_{r0}^2}; \quad (3)$$

$$\Delta B_{r0} = \frac{X_{r0}}{(R_{r0} \cdot s_1^{-1})^2 + X_{r0}^2} - \frac{X_{r0}}{(R_{r0} \cdot s_2^{-1})^2 + X_{r0}^2}. \quad (4)$$

Для этого, разделив  $\Delta G_{r0}$  на  $\Delta B_{r0}$  и обозначив постоянную времени ротора как  $\tau_r = X_{r0}/R_{r0}$ , после соответствующих преобразований, получим квадратное уравнение относительно неизвестной постоянной времени  $\tau_r$  с известными из опытов 1, 2 коэффициентами

$$s_1 \cdot s_2 \cdot \tau_r^2 + \Delta G_{r0} / \Delta B_{r0} \cdot (s_1 + s_2) \cdot \tau_r - 1 = 0. \quad (5)$$

Из решения уравнения (5) находим  $\tau_r$

$$\tau_r = -\Delta G_{r0} \cdot (s_1^{-1} + s_2^{-1}) / (2\Delta B_{r0}) + \sqrt{\Delta G_{r0}^2 \cdot (s_1^{-1} + s_2^{-1})^2 / (4\Delta B_{r0}^2) + s_1^{-1} s_2^{-1}}.$$

Используя теперь  $\tau_r$  и выражения (3), (4), находим параметры ротора  $R_{r0}$ ,  $X_{r0}$  как

$$R_{r0} = \Delta G_{r0}^{-1} \cdot [s_1 \cdot (1 + \tau_r^2 s_1^2)^{-1} - s_2 \cdot (1 + \tau_r^2 s_2^2)^{-1}]; \quad (6)$$

$$X_{r0} = \Delta B_{r0}^{-1} [(1 + \tau_r^{-2} s_1^{-2})^{-1} - (1 + \tau_r^{-2} s_2^{-2})^{-1}]. \quad (7)$$

Так как параметры ротора для области номинальных скольжений уже известны, то, вычислив проводимости ротора при скольжениях  $s_1$  или  $s_2$  с использованием (6), (7) и учитывая (1), (2), составим уравнения для определения параметров контура потерь в стали и индуктивного сопротивления взаимной индукции

$$G_{rm}(s_1) - G_{r0}(s_1) = R_{fe} / (R_{fe}^2 + X_{fe}^2); \quad (8)$$

$$B_{rm}(s_1) - B_{r0}(s_1) = 1 / X_m + X_{fe} / (R_{fe}^2 + X_{fe}^2). \quad (9)$$

Из уравнений (8), (9), с учетом соотношения  $X_{fe} = k_{fe} \cdot R_{fe}$ , следует

$$R_{fe} = (1 + k_{fe}^2)^{-1} \cdot [G_{rm}(s_1) - G_{r0}(s_1)]^{-1};$$

$$X_m = \{B_{rm}(s_1) - B_{r0}(s_1) - k_{fe} \cdot [G_{rm}(s_1) - G_{r0}(s_1)]\}^{-1}.$$

В зависимости от формы паза ротора, его сопротивления из-за вытеснения тока могут при скольжениях, больше критического, существенно отличаться от  $R_{r0}$  и  $X_{r0}$ , найденных по (6) и (7). Поэтому определим сопротивления ротора  $R_{r1}$  и  $X_{r1}$  при скольжении  $s_3 = 1$ , используя входные сопротивления  $R_{vx}(s_3)$  и  $X_{vx}(s_3)$ , полученные из опыта подачи напряжения на статор при неподвижном роторе. С учетом уже известных сопротивлений статора, контура потерь в стали и взаимной индуктивности, параметры ротора при  $s_3 = 1$  найдем следующим образом. Подставив в выражения (1), (2) значение скольжения  $s_3 = 1$ , определим  $G_{rm}(s_3)$  и  $B_{rm}(s_3)$ , а затем сопротивления ротора как

$$R_{r1} = \frac{G_{rm}(s_1) - G_{fe}}{[G_{rm}(s_1) - G_{fe}]^2 + [B_{rm}(s_1) - B_{fe} - B_m]^2};$$

$$X_{r1} = \frac{B_{rm}(s_1) - B_{fe} - B_m}{[G_{rm}(s_1) - G_{fe}]^2 + [B_{rm}(s_1) - B_{fe} - B_m]^2}.$$

Воспользуемся теперь предложенным в [8] способом замены глубокопазного ротора эквивалентным двухклеточным с независимыми от скольжения параметрами  $R_{k1}$ ,  $X_{k1}$  и  $R_{k2}$ ,  $X_{k2}$  в каждой из клеток. Для определения параметров этих клеток составим систему уравнений, основанную на равенстве уже известных сопротивлений ротора  $R_{r0}$ ,  $X_{r0}$ ,  $R_{r1}$ ,  $X_{r1}$  и результирующих сопротивлений эквивалентного двухклеточного ротора при скольжениях  $s_3 = 1$  и одного из близких к номинальному  $s_1$  или  $s_2$

$$R_{r0} s_1^{-1} + jX_{r0} - \frac{[R_{k1} s_1^{-1} + jX_{k1}][R_{k2} s_1^{-1} + jX_{k2}]}{R_{k1} s_1^{-1} + jX_{k1} + R_{k2} s_1^{-1} + jX_{k2}} = 0; \quad (10)$$

$$R_{r1} + jX_{r1} - \frac{(R_{k1} + jX_{k1})(R_{k2} + jX_{k2})}{R_{k1} + jX_{k1} + R_{k2} + jX_{k2}} = 0. \quad (11)$$

Добавим к уравнениям (10), (11) уравнение (12), представляющее собой равенство входного сопротивления двигателя  $Z_{vx}(s_3) = R_{vx}(s_3) + jX_{vx}(s_3)$ , замеренного в эксперименте, и входного сопротивления, рассчитанного по схеме замещения при  $s_3 = 1$

$$Z_{yx}(s_3) - \left\{ R_s + jX_s + \left[ (R_{fe} + jX_{fe})^{-1} + (jX_m)^{-1} + \frac{R_{k1} + jX_{k1} + R_{k2} + jX_{k2}}{(R_{k1} + jX_{k1})(R_{k2} + jX_{k2})} \right]^{-1} \right\}^{-1} = 0. \quad (12)$$

Выделив в уравнениях (10)–(12) вещественные и мнимые части, получим нелинейную систему уравнений с четырьмя неизвестными, решив которую методом простых итераций или Ньютона, найдем параметры контуров ротора. В качестве начальных приближений можно принять для первого контура значения  $R_{r0}, X_{r0}$ , а для второго  $R_{r1}, X_{r1}$ .

Отметим, что с целью повышения точности количество опытов нагрузки с различными коэффициентами загрузки механизма, в которых измеряются параметры двигателя, может быть увеличено. В этом случае значения параметров определяются путем решения переопределенной системы уравнений методом наименьших квадратов.

Таким образом, все параметры схемы замещения теперь найдены и их можно использовать для расчета статических и динамических характеристик электропривода. Статические характеристики в виде зависимостей от скольжения токов, мощностей, вращающего момента при различной величине и частоте питающего напряжения могут быть получены на основе расчета токов и напряжений непосредственно по схеме замещения (рис. 1).

Для расчета динамических характеристик АД в режимах пуска, наброса и сброса нагрузки, понижения напряжения, короткого замыкания и др. воспользуемся дифференциальными уравнениями, записанными относительно потокоцеплений в одной из систем координат, например  $\alpha, \beta$ , неподвижной относительно статора. Все величины в уравнениях выразим в относительных единицах, при этом индуктивности будут равны соответствующим индуктивным сопротивлениям, синхронная частота вращения  $\omega_c=1$ , механическая постоянная времени  $\tau_J$  будет выражена в радианах

$$\begin{cases} p\Psi_{s\alpha} = u_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha} \\ p\Psi_{s\beta} = u_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta} \\ p\Psi_{fe\alpha} = -R_{fe} \cdot i_{fe\alpha} \\ p\Psi_{fe\beta} = -R_{fe} \cdot i_{fe\beta} \\ p\Psi_{k1\alpha} = -R_{k1} \cdot i_{k1\alpha} - \omega \cdot \Psi_{k1\beta} \\ p\Psi_{k1\beta} = -R_{k1} \cdot i_{k1\beta} + \omega \cdot \Psi_{k1\alpha} \\ p\Psi_{k2\alpha} = -R_{k2} \cdot i_{k2\alpha} - \omega \cdot \Psi_{k2\beta} \\ p\Psi_{k2\beta} = -R_{k2} \cdot i_{k2\beta} + \omega \cdot \Psi_{k2\alpha} \\ p\omega = \tau_J^{-1} \cdot [m_e - m_c(\omega)] \\ p\gamma = \omega_c - \omega \\ m_e = \Psi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha} \end{cases},$$

где  $u_{s\alpha} = U_m \cos(\omega_c t)$ ;  $u_{s\beta} = U_m \sin(\omega_c t)$ ;  $\gamma$  – угол положения ротора, с помощью которого ток фазы А ро-

тора в собственной системе координат находим как  $i_{ra} = (i_{k1\alpha} + i_{k2\alpha}) \cos \gamma + (i_{k1\beta} + i_{k2\beta}) \sin \gamma$ .

Связь между проекциями токов и потокоцеплений устанавливается следующими выражениями

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{fe\alpha} \\ i_{k1\alpha} \\ i_{k2\alpha} \end{bmatrix} = X^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_{s\alpha} \\ \Psi_{fe\alpha} \\ \Psi_{k1\alpha} \\ \Psi_{k2\alpha} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} i_{s\beta} \\ i_{fe\beta} \\ i_{k1\beta} \\ i_{k2\beta} \end{bmatrix} = X^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_{s\beta} \\ \Psi_{fe\beta} \\ \Psi_{k1\beta} \\ \Psi_{k2\beta} \end{bmatrix},$$

где матрица индуктивностей  $X$  составляет

$$X = \begin{bmatrix} X_s + X_m & X_m & X_m & X_m \\ X_m & X_{fe} + X_m & X_m & X_m \\ X_m & X_m & X_{k1} + X_m & X_m \\ X_m & X_m & X_m & X_{k2} + X_m \end{bmatrix}.$$

Найденные параметры схемы замещения двигателя также могут быть использованы для уточнения значений тока холостого хода  $I_{xx}$  АД и номинального скольжения  $s_n$ . Величину  $I_{xx}$  определяем как

$$I_{xx} = U \cdot \{ [(R_{fe} + jX_{fe})^{-1} + (jX_m)^{-1}]^{-1} + R_s + jX_s \}^{-1}.$$

Номинальное скольжение определяем из (13) при условии равенства единице входного сопротивления АД при номинальном скольжении

$$R_s + jX_s + [(jX_m)^{-1} + (R_{k1}/s_n + jX_{k1})^{-1} + (R_{k2}/s_n + jX_{k2})^{-1} + (R_{fe} + jX_{fe})^{-1}]^{-1} = 1. \quad (13)$$

Если эффект вытеснения тока в роторе двигателя проявляется незначительно, то методика определения параметров остается без изменений. В таком случае в результате расчетов будут получены большие величины сопротивлений одного из контуров ротора.

Пример определения параметров четырех асинхронных двигателей различной мощности, согласно предложенной методике, приведен в таблице.

Разработанный метод может быть также использован для определения параметров схемы замещения по каталожным данным. Он проще, чем приведенный в [4], а точность совпадения исходных и рассчитанных характеристик выше.

По найденным параметрам были определены статические характеристики двигателя АДТ-8000 (рис. 2) и динамические в режиме пуска (рис. 3).

Достоверность разработанного метода подтверждается удовлетворительным совпадением характеристик АД, полученных в результате расчета и эксперимента. Отклонение режимных параметров не превышало 5–7%.

Таблиця  
Результаты расчетов параметров схем замещения АД  
согласно предложенной методике

№ АД	АД1	АД2	АД3	АД4
Тип Параметр	АТД-8000	А3-12-52	ДА30-П12-8/10А	ВРП200 ЛК4
$P_{ном}$ , кВт	8000	630	330	45
$U_{ном}$ , кВ	6	6	6	0,38
$n_{ном}$ , об/мин	3000	1500	600	1500
Скольжения в опытах, о.е.				
$s_1$	0,012	0,013	0,009	0,023
$s_2$	0,0053	0,008	0,004	0,01
$s_3$	1	1	1	1
Входные сопротивления двигателей в опытах, о.е.				
$R_{вх}(s_1)$	0,983	0,932	0,92	0,731
$X_{вх}(s_1)$	0,485	0,47	0,575	0,645
$R_{вх}(s_2)$	1,658	1,324	1,253	0,747
$X_{вх}(s_2)$	1,27	0,747	1,304	1,236
$R_{вх}(s_3)$	0,038	0,042	0,04	0,069
$X_{вх}(s_3)$	0,181	0,17	0,171	0,127
Сопротивления схемы замещения, о.е.				
$R_s$	0,013	0,013	0,01	0,026
$X_s$	0,093	0,088	0,088	0,071
$X_m$	3,777	4,407	2,804	1,664
$R_{fe}$	80,158	17,654	13,921	229,99
$X_{fe}$	48,095	10,593	8,353	137,99
$R_{k1}$	0,015	0,018	0,012	0,045
$X_{k1}$	0,15	0,28	0,116	0,313
$R_{k2}$	0,119	0,057	0,261	0,069
$X_{k2}$	0,205	0,115	0,154	0,064
Номинальное скольжение и ток холостого хода, о.е.				
$s_n$	0,012	0,01	0,00962	0,024
$I_{хх}$	0,270	0,28	0,417	0,579

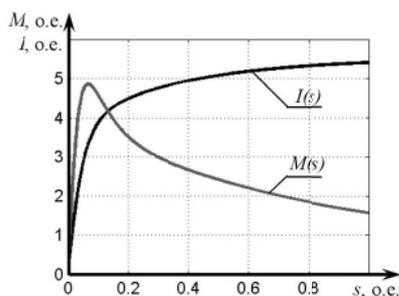


Рис. 2. Статические характеристики двигателя АДТД-8000:  $s$  – скольжение двигателя;  $I$  – действующее значение тока статора;  $M$  – вращающий момент двигателя

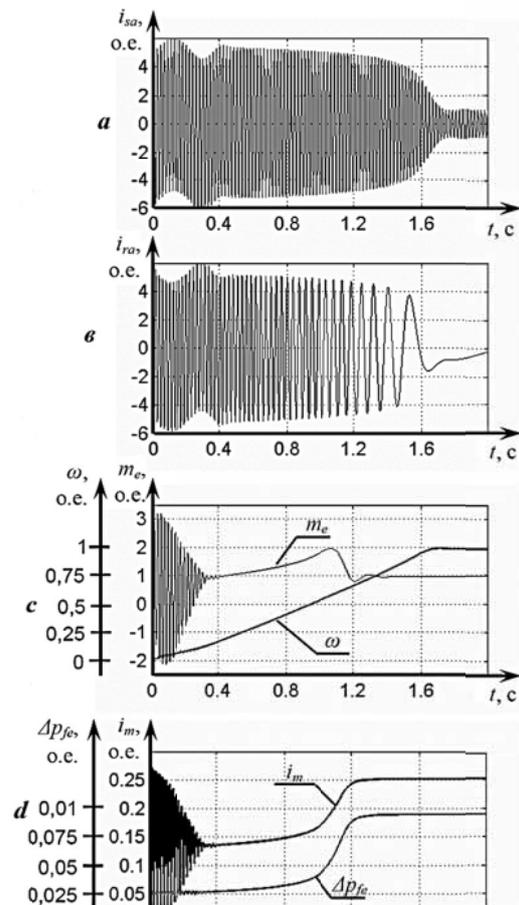


Рис. 3. Динамические характеристики двигателя АДТД-8000 при пуске в функции времени  $t$ : а – ток  $i_{sa}$  фазы А статора; б – ток  $i_{ra}$  фазы А ротора; в – электромагнитный момент  $m_e$  и частота вращения ротора  $\omega$ ; д – ток намагничивания  $i_m$  и потери в стали  $\Delta p_{fe}$

**Выводы и направления дальнейших исследований.**

1. Разработан метод экспериментального определения параметров Т-образной схемы замещения асинхронного электропривода, отличающийся простотой реализации, так как не требует специализированного оборудования и проведения опыта холостого хода, а использует данные из нормальных эксплуатационных режимов работы привода под нагрузкой и в режиме пуска.

2. Показано, что по данным двух опытов нагрузки при различных скольжениях могут быть определены параметры ветви намагничивания для учета потерь в стали, ток холостого хода, номинальное скольжение, а также значения параметров ротора в области номинальных скольжений.

3. Приведен способ учета влияния вытеснения тока на параметры ротора путем представления его в виде двух параллельно включенных ветвей, параметры которых находят по значениям входных сопротивлений в опытах нагрузки и в режиме пуска при  $s=1$ .

В ходе дальнейших исследований целесообразно учесть насыщение магнитных цепей по путям главного потока и потоков рассеяния, а также исследование влияния погрешности измерений на искомые параметры схемы замещения.

### Список литературы / References

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины / Иванов-Смоленский А.В. – [3-е изд., стереот.]. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – Т. 1. – 2006. – 652 с.  
Ivanov-Smolenskiy, A.V. (2006), *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machines], Vol.1, Izdatelskiy dom MEI, Moscow, Russia.
2. Saffet Ayasun and Chika O. (2005), "Induction motor tests using MATLAB/Simulink and their Integration into undergraduate electric machinery courses", *IEEE Transactions on education*, Vol. 48, no. 1, pp. 37–46.
3. Сивокобыленко В.Ф. Определение параметров схем замещения глубокопазных асинхронных электродвигателей на основе экспериментальных данных / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // *Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Тематичний випуск „Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика“*. – 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 562–565.  
Sivokobylenko, V.F. and Tkachenko, S.N. (2012), "Determination of equivalent schemes of deep-bar induction motors parameters using experimental data", *Elektromekhanichni ta energozberigayuchi systemy. Tematichniy vypusk "Problemy avtomatyzovanogo elektropryvoda. Teoriia i praktyka"*, no. 3/2012(9), pp. 562–565.
4. Мощинский Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Корякин // *Электричество*. – 1998. – № 4. – С. 38–42.  
Moshinskiy, Yu.A. (1998), "Parameters of induction motor equivalent circuit estimation using catalogue data", *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 38–42.
5. Zhi Gao, Larry A. Turner and Roy S. (2012), Colby Patent 2012/0098477 (US), H02P 23/14 Methods and devices for estimation of induction motor inductance parameters, Appl. No.: 12/909.589. Filed: 21.10.2010. Pub. Date: 26.04.2012.
6. Бешта А.С. Особенности применения Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя для задач идентификации параметров / А.С. Бешта, А.А. Семин // *Енергомеханічні та енергозберігаючі системи*. – 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 553–555.  
Beshta, A.S. and Semin, A.A. (2012), "Special feature of using of T-shaped induction motor equivalent circuit for problems of parameters identification", *Energomekhanichni i energozberigayuchi systemy*, no. 3/2012 (19), pp. 553–555.
7. Benecke, M., Doebbelin, R., Griepentrog, G. and Lindemann, A. (2011), "Skin effect in squirrel cage rotor bars and its consideration in simulation of non-steady-state operation of induction machines", *Progress in electromagnetics research symposium proceedings*, Marrakesh, Morocco: Mar. 20–23, pp. 1451–1455.
8. Сивокобыленко В.Ф. Математичне моделювання в електротехніці та енергетиці / Сивокобыленко В.Ф. – Донецьк: РВА ДонНТУ, 2005. – 350 с.  
Sivokobylenko, V.F. (2005), *Matematichne modelivannia v elektrotekhnitsi i energetytsi* [Mathematical Modelling in Electrical and Power Engineering], RVA DonNTU, Donetsk, Ukraine.
9. Семин А.А. Оценка эффективности экспериментального определения параметров схем замещения асинхронных двигателей с учетом потерь в стали / А.А. Семин // *Вісник національного університету „ХПІ“*. – 2013. – № 36(1009). – С. 149–151.  
Semin, A.A. (2013), "The efficiency estimation of parameters experimental determining for induction motor equivalent circuit with iron loss", *Visnyk natsionalnogo universytetu "KhPI"*, no. 36(1009), pp. 149–151.
10. Теоретические основы электротехники: в 3-х томах / [Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.] – СПб.: „Питер“, 2003.  
Demirchan, K.S., Neyman, L.R., Korovkin, N.V. and Chechurin, V.L. (2003), *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theory of Electrical Engineering], Piter, Saint-Petersburg, Russia.

**Мета.** Розробка методу, що дозволяє за даними експлуатаційних режимів пуску та роботи з навантаженням асинхронного електродвигуна визначити параметри схеми заміщення, яка враховує втрати у сталі та вплив ефекту витіснення струмів у роторі, а також алгоритму розрахунку за визначеними параметрами двигуна усталених та перехідних режимів роботи привода.

**Методика.** Включає визначення параметрів статорного кола, обчислення, за даними двох дослідів з різними коефіцієнтами завантаження механізму, вхідних активного та індуктивного опорів двигуна. Визначаються різниці провідностей роторних кіл для двох дослідів навантаження, відношення яких дозволяє скласти квадратне рівняння, та з його рішення знайти сталу часу та параметри ротора для області робочих ковзань. Після цього обчислюються параметри контура втрат у сталі та індуктивного опору взаємодукції, а також еквівалентного двокліткового ротора з параметрами, що не залежать від ковзання. Статичні характеристики двигуна можуть бути отримані на основі розрахунків безпосередньо за схемою заміщення. Для розрахунку динамічних характеристик двигуна складені диференціальні рівняння в нерухомій відносно статора системі координат.

**Результати.** Розроблено метод експериментального визначення параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного електропривода, що відрізняється простотою реалізації, оскільки не потребує спеціалізованого обладнання та проведення дослідів неробочого ходу, а використовує дані з нормальних експлуатаційних режимів роботи привода при навантаженні та в режимі пуску. Показано, що за даними двох дослідів навантаження при різних ковзаннях можуть бути визначені параметри гілки намагнічування для врахування втрат у сталі, струм неробочого ходу, номінальне ковзання, а

також значення параметрів ротора в області номінальних ковзань. Наведено спосіб урахування впливу витіснення струму на параметри ротора шляхом представлення його у вигляді двох паралельно включених гілок, параметри яких визначають за значеннями входних опорів у дослідах навантаження та в режимі пуску при одиничному ковзанні.

**Наукова новизна.** Показано, що на основі вимірювання параметрів пускового режиму та режимів роботи під навантаженням є можливим визначити втрати, струм неробочого хода та номінальне ковзання асинхронного двигуна, а також параметри контурів ротора, які враховують ефект витіснення струму, що дозволяє уточнити каталожні дані.

**Практична значимість.** Полягає у зниженні витрат на визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна завдяки зменшенню кількості необхідних дослідів.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, схема заміщення, параметри, рівняння, опір, індуктивність, витіснення струму, втрати у сталі

**Purpose.** The elaboration of the method for determining the parameters of the induction motor equivalent circuit, considering iron loss and skin-effect, using data of starting and normal operating modes, and substantiation of the calculating algorithm of steady-state and transient operation modes of the drive involving the parameters obtained.

**Methodology.** Includes determining the stator circuit parameters, calculation of motor input resistance and inductive reactance based on data from two experiments with different load factors of the mechanism. The difference between the conductions of rotor circuits for the two load tests have been determined, the relationship of which allows us to get quadratic equation and, based on its solution, to define the time constant and rotor parameters for operating slip zone. Then the parameters of the

iron loss circuit, mutual inductance and parameters of equivalent double-circuit rotor have been calculated. Static motor characteristics can be obtained by direct using of equivalent circuit. For the purpose of motor dynamic characteristics calculating the differential equations in stationary reference frame have been used.

**Findings.** We have developed the method for the experimental determination of parameters T-shaped equivalent circuit of an induction electric drive, which is characterized by simplicity of implementation, as it does not require specialized equipment and carrying out idling test, and uses only data received under normal operating conditions of the drive under load and in starting mode. Based on two load tests under different slip the parameters of saturation branch, no-load current, rated slip, and rotor parameters in rated slip range. The method allows to take into account the influence of rotor skin-effect on rotor parameters by its presentation as two parallel cages, parameters of which are determined based on input impedances in load test and starting duty when slip equals one.

**Originality.** We have proved that based on the parameters measured in starting and loading modes is possible to determine losses, no-load current and rated slip of an induction motor, as well as parameters of rotor circuits which consider skin-effect, that allows to define catalogue data more accurately.

**Practical value.** The method allows reduction of costs spent for determining the parameters of induction motor equivalent circuit due to reduction in the number of experiments required.

**Keywords:** induction motor, equivalent circuit, parameters, equation, resistance, inductance, skin-effect, iron loss

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук С.Б. Ковальовим. Дата надходження рукопису 25.10.13.*