

Определение параметров схем замещения и характеристик асинхронных двигателей

СИВОКОБЫЛЕНКО В.Ф., ТКАЧЕНКО С.Н., ДЕРКАЧЕВ С.В.

Разработан метод определения по каталожным данным параметров эквивалентной схемы замещения асинхронного двигателя (АД), в которой вытеснение тока в роторе учитывают с помощью двух включенных параллельно активно-индуктивных контуров, а потери в стали – с помощью короткозамкнутого контура на статоре. Параметры находят из решения нелинейной системы уравнений, составленной для условий совпадения каталожных данных и рассчитанных по схеме замещения. Приведены математические модели АД, в которых найденные параметры схемы замещения используются для определения рабочих и динамических характеристик двигателя в различных режимах. Расчеты, проведенные для асинхронных двигателей различного типа, показали практически полное совпадение расчетных и каталожных данных, подтвердив высокую эффективность предложенного метода. В статье это показано на примере асинхронного двигателя типа ДАМСО 148-8.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, параметры схемы замещения, потери в стали, эффект вытеснения тока, система уравнений

Основным типом электропривода механизмов на промышленных предприятиях и в системе собственных нужд (СН) тепловых и атомных электростанций являются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором (КЗР). Для анализа характеристик и оценки работы АД в различных режимах требуется знание параметров эквивалентной схемы замещения (ЭСЗ). Определение параметров на основе каталожных и экспериментальных данных является актуальной задачей, поскольку паспортная информация, предоставляемая заводами-изготовителями, не содержит данных о параметрах ЭСЗ.

Анализ последних исследований. Вопросам идентификации параметров АД посвящены многие работы [1–8 и др.]. Однако применяемые их авторами методы имеют ряд недостатков. Требуют, например, кроме каталожных данных, сведений о конструктивных особенностях машины [1], о значениях КПД для различных коэффициентов загрузки [2], не учитывают влияния эффекта вытеснения тока в роторе [2–6], используют для учета потерь в стали активное сопротивление в ветви намагничивания [2], что не является корректным при анализе переходных процессов. Таким образом, найденные по синтезированным указанными методами схемам замещения значения токов и моментов могут отличаться от исходных (каталожных) на 30–40% и более.

Задача исследований. В статье ставится задача определения по каталожным данным таких параметров схемы замещения ширококопозного АД с КЗР, которые обеспечивали бы сходимость заданных в паспорте двигателя значений токов, момен-

тов и КПД с расчётными. Искомые параметры будем определять с учетом эффекта вытеснения токов в роторе и потерь в стали статора.

Примем за основу схему АД (рис. 1), в которой для учёта эффекта вытеснения тока в обмотке короткозамкнутого ротора будем использовать [7, 8] два параллельно включенных контура с независимыми от скольжения активными R_{r1} , R_{r2} и индуктивными сопротивлениями рассеяния X_{sr1} , X_{sr2} . Для учета потерь в стали статора предусмотрим в нем дополнительный короткозамкнутый контур с параметрами R_{fe} , X_{sfe} . При этом все контуры статора, ротора и дополнительный имеют общее сопротивление взаимоиндукции X_m . Пренебрежем насыщением магнитных потоков и потерями в стали ротора. Будем считать известными каталожные или уточненные экспериментальные данные двигателя: номинальные значения мощности P_H , кВт; линейного напряжения статора U_H , кВ; тока статора I_H , А; коэффициента мощности $\cos \varphi_H$; КПД η_H , отн.ед.; скольжения s_H , отн.ед.; а также кратности значений пускового тока статора $I_{п}$, отн.ед.; максимального момента M_M , отн.ед.; пускового момента $M_{п}$, отн.ед.; момента инерции J , кг·м².

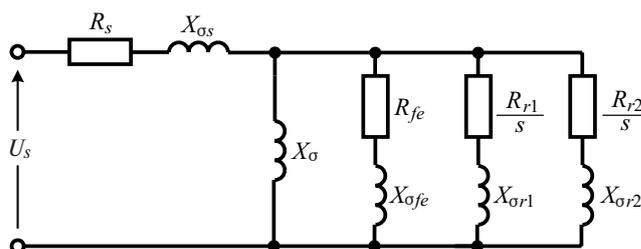


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения ширококопозного асинхронного двигателя с контуром потерь в стали статора

Все зависимости и значения параметров в дальнейшем будем приводить в системе общепринятых относительных единиц, когда за базисную мощность принята номинальная полная мощность АД [8], при этом $U_H = 1$, $I_H = 1$, $P_H = \cos \varphi_H h_H$, $M_H = P_H (1 - s_H)^{-1}$.

Для определения вектора искомым параметров эквивалентной схемы замещения

$$Z = [R_s, X_{ss}, X_m, R_{fe}, X_{sfe}, R_{r1}, X_{sr1}, R_{r2}, X_{sr2}]^{tr} \quad (1)$$

составим систему нелинейных уравнений (2), записанную из условий равенства расчётных и каталожных значений (для скольжений s_H , $s_1 = 1$ и напряжения $U_H = 1$) номинального и пускового токов статора; номинального, максимального и пускового значений вращающих моментов; номинального КПД. Систему уравнений дополним также неравенствами, обеспечивающими условия физической реализуемости параметров АД:

$$\begin{aligned} M_H - M(Z, s_H) &= 0; \\ I_H - I_s(Z, s_H) &= 0; \\ M_H - M(Z, s_1) &= 0; \\ I_H - I_s(Z, s_1) &= 0; \\ M_M - M(Z, s_M) &= 0; \\ h_H - h(Z, s_H) &= 0; \\ R_{r1} > 0; R_{r2} > 0; R_{fe} > 0; X_{sr1} > 0; \\ X_{sr2} > 0; X_{sfe} > 0; X_m > 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Запишем требуемые для решения уравнений (2) расчетные выражения токов статора, моментов и КПД. Определив входное сопротивление двигателя $Z_{BX}(Z, s)$, найдем ток статора:

$$I_s(Z, s) = \frac{U_H}{Z_{BX}(Z, s)}$$

$$Z_{BX}(Z, s) = Z_s + [Z_m^{-1} + Z_{fe}^{-1} + Z_{r1}(s)^{-1} + Z_{r2}(s)^{-1}]^{-1}; \quad (3)$$

$$Z_s = R_s + jX_{ss}; \quad Z_{r1}(s) = \frac{R_{r1}}{s} + jX_{sr1};$$

$$Z_{r2}(s) = \frac{R_{r2}}{s} + jX_{sr2}; \quad Z_{fe} = R_{fe} + jX_{sfe}; \quad Z_m = jX_m.$$

Так как в относительных единицах значения момента и активной мощности совпадают, то выражение для момента найдем как разность между входной активной мощностью $P_{BX}(Z, s)$ и потерями мощности $DP(Z, s)$:

$$M(Z, s) = P_{BX}(Z, s) - DP(Z, s); \quad (4)$$

$$P_{BX}(Z, s) = \operatorname{Re}(Z_{BX}(Z, s)) |I_s(Z, s)|^2,$$

где $DP(Z, s)$ – суммарные потери мощности в АД, включающие потери в меди обмоток статора DP_s и ротора DP_r , в стали статора DP_{fe} , а также механические $DP_{мех}$ и добавочные $DP_{доб}$. Суммарное значение двух последних примем равным 1% номинальной мощности, тогда

$$\begin{aligned} DP(Z, s) &= DP_s + DP_r + DP_{fe} + 0,01P_H; \\ DP_s &= R_s |I_s|^2; \quad DP_r = R_{r1} |I_{r1}|^2 + R_{r2} |I_{r2}|^2; \\ DP_{fe} &= R_{fe} |I_{fe}|^2; \end{aligned} \quad (5)$$

$$DP_r = R_{r1} \left| \frac{U_m}{Z_{r1}(s)} \right|^2 + R_{r2} \left| \frac{U_m}{Z_{r2}(s)} \right|^2;$$

$$DP_{fe} = R_{fe} \left| \frac{U_m}{Z_{fe}} \right|^2; \quad U_m = U_H - Z_s I_s(Z, s).$$

Находим расчётное значение КПД:

$$h(Z, s_H) = (P_{BX}(Z, s_H) - DP(Z, s_H)) / (P_{BX}(Z, s_H))^{-1}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора X_{ss} примем равным половине значения входного сопротивления АД при заторможенном роторе ($s_1 = 1$):

$$X_{ss} = U_H (2I_H)^{-1}. \quad (6)$$

Для решения нелинейной системы уравнений (2) найдем начальные приближения для остальных искомым параметров вектора Z . Для определения активного сопротивления статора и параметров контура потерь в стали воспользуемся уравнениями баланса активных мощностей для номинального режима.

Суммарные потери в асинхронной машине (DP) состоят из переменных потерь, зависящих от токов статора и ротора (потери в меди статора DP_{var}^s и ротора DP_{var}^r), постоянных потерь (потери в стали статора DP_{fe}), добавочных и механических потерь. Тогда можно записать соотношения для номинального режима:

$$DP_H = DP_{Hvar}^s + DP_{Hvar}^r + DP_{fe} + DP_{доб} + DP_{мех}, \quad (7)$$

$$\text{где } DP_H = \cos \varphi_H (1 - h_H); \quad DP_{Hvar}^r = \frac{P_H s_H}{1 - s_H};$$

$$DP_{fe} = R_{fe} \left| \frac{U_H - Z_s I_H}{R_{fe} + jX_{sfe}} \right|^2.$$

Известно [8], что значение КПД для АД имеет максимальное значение при коэффициенте загрузки

ки k_3 примерно (70–75)% P_H , а переменные потери при этом равны постоянным, т.е. потерям в стали, которые найдем как

$$DP_{const} = DP_{fe} = \frac{1}{2} DP_H \frac{1}{1+k_3^2} = \frac{\cos j_H (1-h_H)}{2(1+k_3^2)}. \quad (8)$$

Определив по (7) и (8) переменные потери в статоре, найдем активное сопротивление его обмоток:

$$R_s = DP_{Hvar}^S I_H^{-2};$$

$$DP_{Hvar}^S = DP_H - DP_{Hvar}^R - DP_{const} - DP_{доб} - DP_{мех}. \quad (9)$$

Контур потерь в стали состоит из активного и индуктивного сопротивлений, соотношение между которыми согласно [9] может быть принято как $X_{Sfe} = 0,5, 0,7R_{fe}$, тогда с учётом (7) и (8) запишем для активного и индуктивного сопротивлений контура потерь в стали:

$$R_{fe} = \frac{1}{DP_{fe}} \left| \frac{U_H - Z_s I_H}{1+j0,6} \right|^2; \quad X_{Sfe} = 0,6R_{fe}. \quad (10)$$

Для определения общего для всех контуров сопротивления взаимоиндукции X_m воспользуемся приближённой формулой, приведенной в [1]:

$$X_m = \left[\sqrt{1 - \cos j_H} - (M_M - \sqrt{M_M^2 - 1}) \cos j_H \right]^{-1}; \quad (11)$$

$$Z_m = jX_m. \quad (12)$$

Общее полное сопротивление короткозамкнутого ротора при номинальном скольжении:

$$Z_r(s_H) = \frac{\dot{e}}{\dot{e}} \frac{1}{Z_{BX}(Z, s_H) - Z_s} - \frac{1}{Z_{fe}} - \frac{1}{Z_m} \dot{u}^{-1}. \quad (13)$$

В области рабочих скольжений значение сопротивления ротора в основном зависит от параметров рабочего (первого) контура, поэтому сопротивление этого контура примем приблизительно равным:

$$Z_{r1} = \text{Re}(Z_r(s_H))(s_H) + j\text{Im}(Z_r(s_H)) = R_{r1} + jX_{Sr1}. \quad (14)$$

Определим входное полное сопротивление для скольжения $s=1$ и напряжения U_H :

$$Z_{BX}(s_1) = R_s + \frac{M_{\Pi} h_H \cos j_H}{I_{\Pi}^2 (1-s_H)} + \left| I_{fe} \right|^2 \frac{R_{fe}}{I_{\Pi}^2} + \sqrt{\frac{\dot{e}}{\dot{e}} \left[\frac{U_H \dot{u}^2}{I_{\Pi}^2 \dot{u}} - \frac{\dot{e}}{\dot{e}} R_s + \frac{M_{\Pi} h_H \cos j_H}{I_{\Pi}^2 (1-s_H)} + \left| I_{fe} \right|^2 \frac{R_{fe}}{I_{\Pi}^2} \right] \dot{u}^2 \dot{u}}. \quad (15)$$

Сопротивление пускового (второго) контура

$$Z_{r2}(s_1) = \frac{\dot{e}}{\dot{e}} \frac{1}{Z_{BX}(s_1) - Z_s} - \frac{1}{Z_{fe}} - \frac{1}{Z_m} - \frac{1}{Z_{r1}} \dot{u}^{-1} = R_{r2} + jX_{Sr2}. \quad (16)$$

Определив начальные приближения параметров, уточняем их значения путем решения переопределённой системы нелинейных уравнений и неравенств (2) с помощью одного из методов Ньютона, Пауэлла, прямого поиска минимума функционала невязки или с использованием функции Given в пакете РТС® Mathcad [10]. После этого необходима проверка совпадений расчетных и исходных данных и расчет статических и динамических характеристик АД для различных режимов.

В качестве примера приведём результаты расчетов по (1)–(16) параметров двухконтурных схем замещения ряда АД, применяемых в системе собственных нужд ТЭС напряжения 6 кВ с блочными агрегатами 200 МВт. Каталожные данные АД представлены в табл. 1, а результаты расчётов в табл. 2.

По найденным параметрам схем замещения (табл. 2) были рассчитаны для скольжений s_H, s_1 значения токов, моментов и КПД, которые полностью совпали с каталожными. Максимальные значения моментов АД также совпали с каталожными, а найденные значения критических скольжений s_M приведены в табл. 2. Полученные результаты подтверждают эффективность разработанного метода, позволяющего также выполнить анализ статических и динамических характеристик АД. Так, для АД №1 (ДАМСО 148-8, табл. 1) на рис. 2 показаны в относительных единицах зависимости тока статора потребляемой активной мощности и вращающего момента от скольжения. Влияние вытеснения тока в роторе можно оценить с помощью частотной характеристики проводимостей роторных контуров (рис. 3). Зависимости значений

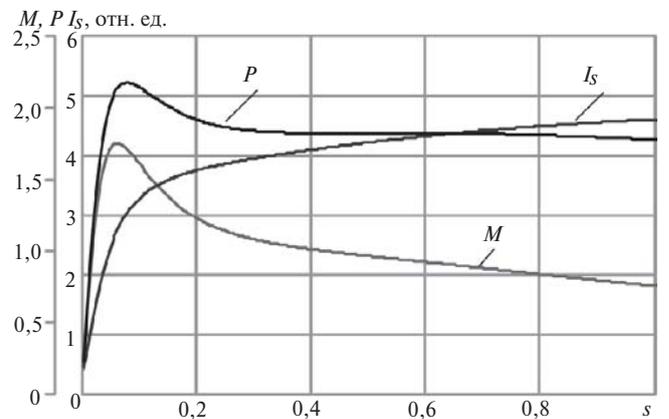


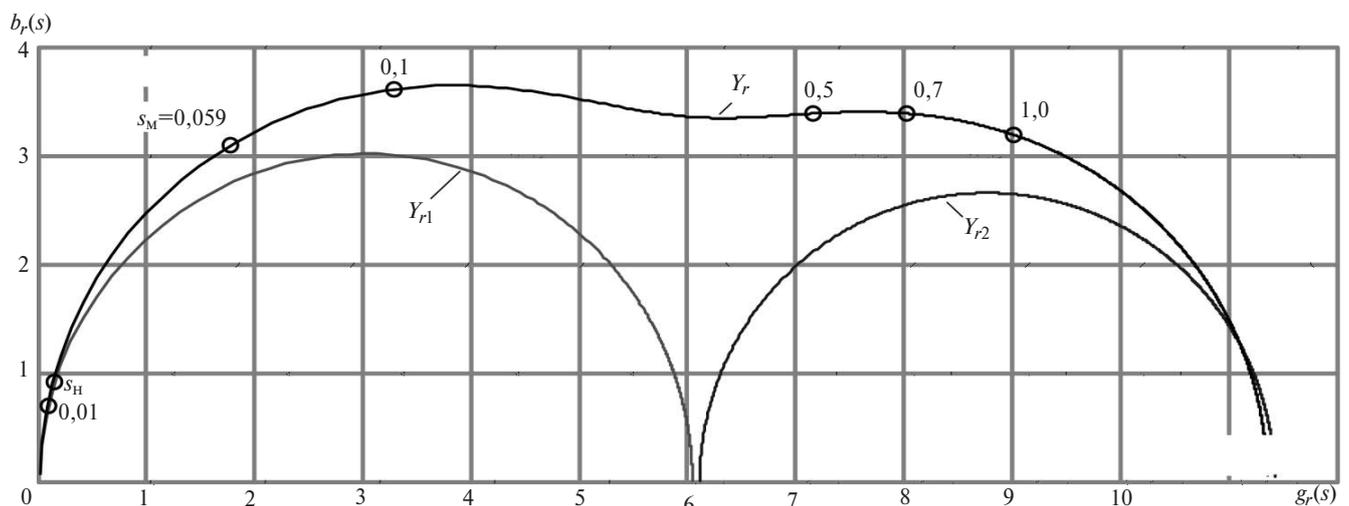
Рис. 2. Зависимости в относительных единицах тока статора, потребляемой активной мощности и вращающего момента от скольжения

Таблица 1

№ АД	Агрегат	Тип двигателя	Значения каталожных данных							
			P_H , кВт	I_H , А	n , об/мин	$\cos j_H$, отн.ед.	η_H , отн.ед.	$I_{п}$, отн.ед.	$M_{п}$, отн.ед.	M_M , отн.ед.
1	ВГД	ДАМСО 148-8	240	32	740	0,84	90	4,6	0,9	2,1
2	КЭН	АВ 113-4	250	29	1480	0,89	92	5,8	1,1	2,2
3	МВ	АЗ 1348-4	800	90	1485	0,9	94	5,4	1	2,1
4	Д	ДАЗО 1914-10/12А	1500	204	597	0,77	91	5,5	0,9	2,5
5	ЦЭН	ВДД 213/54-16	1700	215	368	0,81	94	5,4	1,3	2,5
6	ПЭН	АТМ 3500	3800	450	2985	0,85	96	7	1,4	2,5

Таблица 2

№ АД	Значения параметров схемы замещения (отн.ед.) и критических скольжений АД									
	R_s	X_{ss}	X_m	R_{fe}	X_{sfe}	R_{r1}	X_{sr1}	R_{r2}	X_{sr2}	s_M , %
1	0,044	0,109	2,471	19,825	11,915	0,016	0,166	0,164	0,188	5,98
2	0,034	0,086	3,415	24,765	14,763	0,019	0,274	0,051	0,101	8,21
3	0,026	0,093	3,967	33,009	19,894	0,011	0,192	0,089	0,136	4,45
4	0,041	0,091	1,812	24,514	14,644	0,006	0,145	0,108	0,166	2,7
5	0,017	0,093	2,140	37,215	20,896	0,028	0,242	0,082	0,128	10,99
6	0,018	0,071	2,609	54,233	32,189	0,006	0,175	0,060	0,097	2,6

Рис. 3. Частотные характеристики (отн.ед.) проводимостей контуров ротора: первого (Y_{r1}), второго (Y_{r2}) и результирующего (Y_r)

КПД, тока, потерь в статоре, роторе и стали в функции скольжения (рабочие характеристики машины) представлены на рис. 4.

Найденные параметры схемы замещения позволяют определить также динамические характери-

стики АД в различных режимах (пуске, самозапуске и др.), а также оценить влияние на них потерь в стали. Для этого запишем дифференциальные уравнения АД в неподвижной относительно статора системе координат a, b :

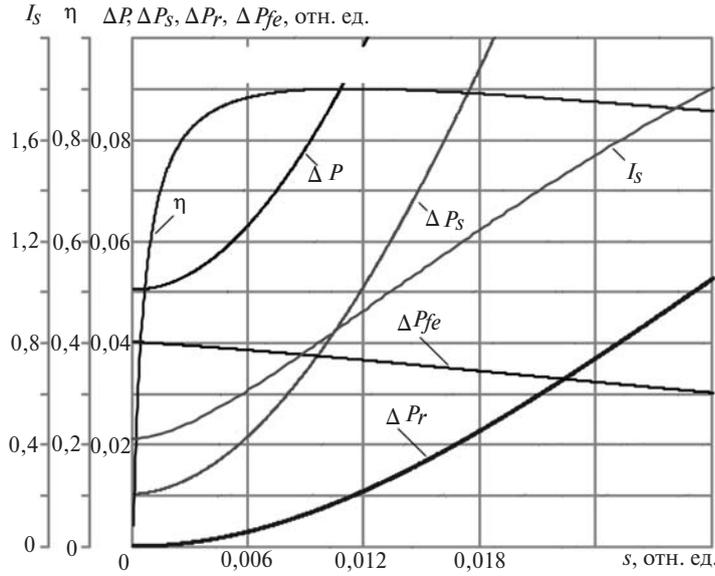


Рис. 4. Зависимости значений КПД, тока и потерь в статоре, роторе и в стали в функции скольжения (рабочие характеристики)

$$\begin{aligned}
 pY_{sb} &= u_{sb} - R_s i_{sb}; \\
 pY_{r1b} &= -R_{r1} i_{r1b} + wY_{r1b}; \\
 pY_{r2b} &= -R_{r2} i_{r2b} + wY_{r2b}; \\
 pY_{feb} &= -R_{fe} i_{feb}; \\
 m_c &= m_0 + (m_{HT} - m_0)w^2; \\
 m &= (Y_{sa} i_{sb} - Y_{sb} i_{sa}). \tag{17}
 \end{aligned}$$

Здесь $Y_{sa}, Y_{r1a}, Y_{r2a}, Y_{fea}, Y_{sb}, Y_{r1b}, Y_{r2b}, Y_{feb}$ – соответственно потокосцепления по осям а и b для статора, первого и второго контуров ротора и контура потерь в стали; w – угловая частота вращения ротора; m – электромагнитный момент; m_c – момент сопротивления; J – суммарный момент инерции привода; m_{HT} – коэффициент загрузки механизма; u_{sa}, u_{sb} – мгновенные значения напряжения статора по осям а и b.

$$\begin{aligned}
 pY_{sa} &= u_{sa} - R_s i_{sa}; \\
 pY_{r1a} &= -R_{r1} i_{r1a} - wY_{r1a}; \\
 pY_{r2a} &= -R_{r2} i_{r2a} - wY_{r2a}; \\
 pY_{fea} &= -R_{fe} i_{fea}; \\
 pW &= J^{-1}(m - m_c);
 \end{aligned}$$

Токи в (17) находим из (19), в котором

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_{Ss} + X_m; & X_{r1} &= X_{Sr1} + X_m; \\
 X_{r2} &= X_{Sr2} + X_m; & X_{fe} &= X_{Sfe} + X_m; \tag{18}
 \end{aligned}$$

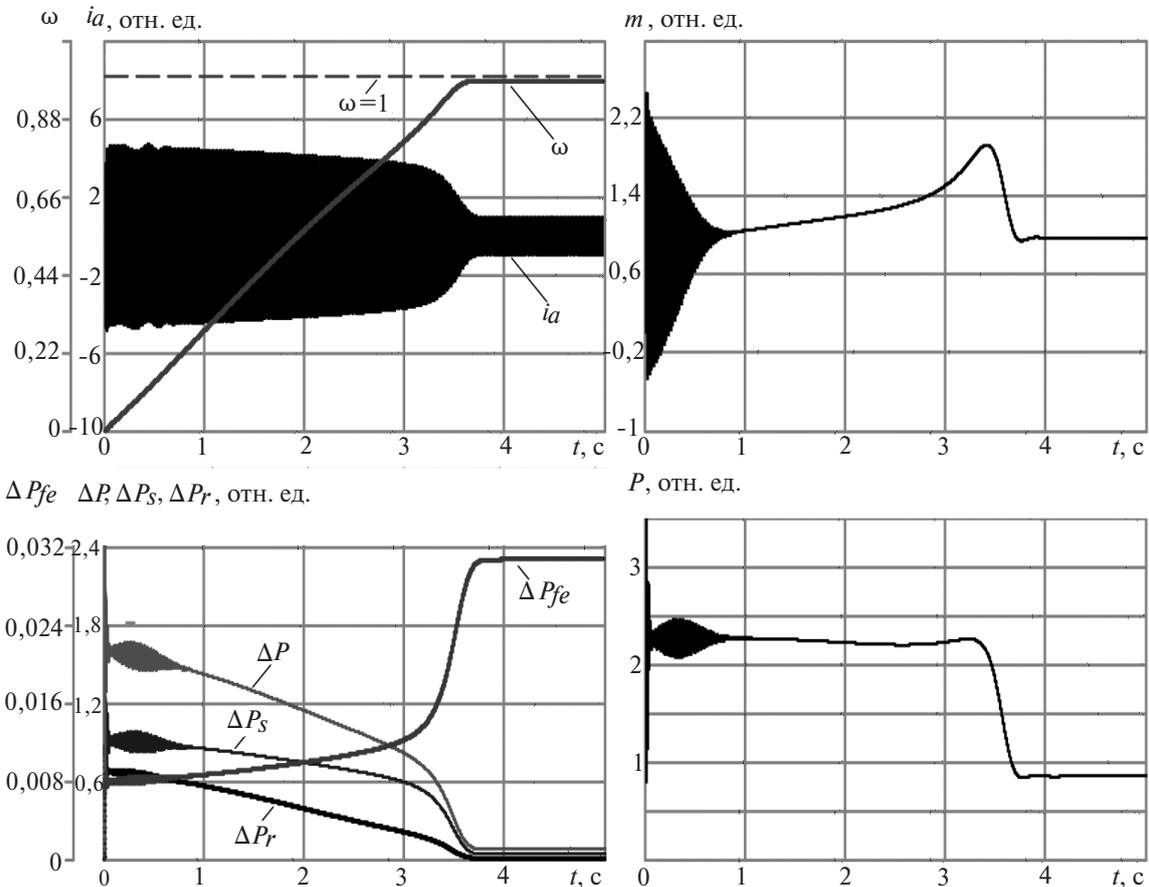


Рис. 5. Результаты математического моделирования режима прямого пуска под нагрузкой АД типа ДАМСО 148-8

$$\begin{matrix}
 \dot{i}_{sa} \\
 \dot{i}_{r1a} \\
 \dot{i}_{r2a} \\
 \dot{i}_{fea} \\
 \dot{i}_{sb} \\
 \dot{i}_{r1b} \\
 \dot{i}_{r2b} \\
 \dot{i}_{feb}
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 X_s & X_m & X_m & X_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 X_m & X_{r1} & X_m & X_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 X_m & X_m & X_{r2} & X_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 X_m & X_m & X_m & X_{fe} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & X_s & X_m & X_m & X_m \\
 0 & 0 & 0 & 0 & X_m & X_{r1} & X_m & X_m \\
 0 & 0 & 0 & 0 & X_m & X_m & X_{r2} & X_m \\
 0 & 0 & 0 & 0 & X_m & X_m & X_m & X_{fe}
 \end{pmatrix}
 \begin{matrix}
 \dot{y}_{sa} \\
 \dot{y}_{r1a} \\
 \dot{y}_{r2a} \\
 \dot{y}_{fea} \\
 \dot{y}_{sb} \\
 \dot{y}_{r1b} \\
 \dot{y}_{r2b} \\
 \dot{y}_{feb}
 \end{matrix}
 \quad (19)$$

Суммарные потери в машине в динамических режимах

$$DP = R_s |i_s|^2 + R_{r1} |i_{r1}|^2 + R_{r2} |i_{r2}|^2 + R_{fe} |i_{fe}|^2 + 0,01 I_H \quad (20)$$

Изложенный в работе алгоритм определения параметров двухконтурной эквивалентной схемы замещения с учётом потерь в стали статора и математическая модель асинхронного двигателя (17)–(20) реализованы в виде компьютерной программы для современной ПЭВМ. Для решения системы дифференциальных уравнений использован метод Рунге–Кутты 4-го порядка [10].

Для примера приведем результаты моделирования прямого пуска ранее упомянутого двигателя типа ДАМСО 148-8 (привод ВГД) мощностью 240 кВт и напряжением статора 6 кВ. Длительность пуска составила 5 с, а зависимости тока статора фазы А, угловой частоты вращения ротора, электромагнитного момента на валу и потерь в машине от времени приведены на рис. 5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984, 4-е, 240 с.
2. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. – Электричество, 1998, № 4, с 38–42.
3. Артишевская С.В. Экспериментально-аналитический метод определения параметров асинхронных машин. – Электричество, 1999, № 11, с. 29–31.
4. Джендубаев А.-З.Р. Математическое моделирование асинхронного генератора с учётом потерь в стали. – Электричество, 2003, № 7, с. 36–46.
5. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом электроприводе. – Электротехника, 2005, № 5, с. 57–61.

6. Boglietti A., Cavagino A., Ferrari L. Induction motor equivalent circuit including the stray load losses in the machine power balance. – IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, vol. 23, iss. 3, p. 796–803.

7. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Расчет параметров схем замещения и пусковых характеристик глубоководных асинхронных машин. – Электричество, 1979, № 10, с. 35–39.

8. Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н. Математическое моделирование характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором с учётом потерь в стали. – Сборник научных работ Донецкого национального технического университета. Электротехника и энергетика. – Донецк, 2007, вып. 7 (128), с. 126 – 131.

9. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. – С.Петербург: Питер, 2004, 463 с.

10. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2005, 350 с.

[3.04.14]

Авторы: Сивокобыленко Виталий Федорович закончил электроэнергетический факультет Харьковского политехнического института в 1957 г. В 1986 г. защитил докторскую диссертацию «Математическое моделирование и оптимизация переходных процессов в многомашиных системах электроснабжения электрических станций и промышленных установок» в Московском энергетическом институте. Заведующий кафедрой «Электрические станции» Донецкого национального технического университета (ДонНТУ).

Ткаченко Сергей Николаевич закончил электротехнический факультет ДонНТУ в 2004 г. В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию «Тепловая защита короткозамкнутого ротора асинхронного электродвигателя на основе контроля параметров текущего режима» в ДонНТУ. Декан немецкого технического факультета ДонНТУ.

Деркачев Сергей Владимирович закончил электротехнический факультет ДонНТУ в 2013 г. Аспирант кафедры «Электрические станции» ДонНТУ.

Elektrichestvo (Electricity), 2014, No. 10, pp. 38–44.

Determining the Parameters of Equivalent Circuits and Characteristics of Induction Motors

V.F. SIVOKOBYLENKO, S.N. TKACHENKO and S.V. DERKACHEV

The article presents a method for determining the parameters of an inductor motor (IM) equivalent circuit based on the catalogue data, in which the displacement of current in the rotor is taken into account using two parallel-connected RL-circuits, and the iron losses are taken into account using a short-circuited loop on the stator. The parameters are found from the solution of a nonlinear system of equations written subject to coincidence of catalogue data with those calculated from the equivalent circuit. The IM mathematical models are presented in which the found equivalent circuit parameters are used for determining the operating and dynamic characteristics of the motor in different modes of its operation. The calculations carried out for different types of induction motors have shown that the calculated data coincide with the catalogue data almost completely, which serves as confirmation of high efficiency of the proposed method. In the article, this is demonstrated taking a DAMSO 148-8 asynchronous motor as an example.

Key words: induction motor, equivalent circuit parameters, iron losses, current displacement effect, system of equations

REFERENCES

1. Syromyatikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i subkhronnykh dvigatelei/Pod red. L.G. Mamikonyantsa* (Modes of Operation of Asynchronous and synchronous motors/ Edit. By L.G. Mamikonyants). Moscow. Publ. «Energoatomizdat», 240 p.
2. Moshckinskii Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1998, No. 4, pp. 38–42.
3. Artshesckaya S.V. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1999, No. 11, pp. 29–31.
4. Dzhendubayev A.-Z.R. *Elektrichestvo (Electricity)*, 2003, No. 7, pp. 36–46.
5. Vinogradov A.B. *Elektrotehnika (Electrical Engineering)*, 2005, No. 5, pp 57–61.
6. Boglietti A., Cavagnino A., Ferraris L. Induction motor equivalent circuit including the stray load losses in the machine power balance. – IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, vol. 23, iss. 3, pp. 796–803.
7. Sivokobylenko V.F., Pavlyukov V.A. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1979, No. 10, pp. 35–39.
8. Sivokobylenko V.F., Tkachenko S.N. *Sbornok nauchnykh rabot Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika i Energetika* (Proc. scientific works of the Donetsk National Technical University. Electrical Engineering and Energy), Donetsk, 2007, iss. 7(128), pp. 126–131.
9. Demirchyan, L.R. Neiman, N.V. Korockin, V.L. Cherurin. *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki* (Theoretical principles of electrical engineering). St. Petersburg. Publ. «Piter», 2004, 463 p.
10. V.F. Sivokobylenko, *Matematicheskoye modelirovaniye v elektrotekhnikе i energetike* (Mathematical Modelling in Electrical and power engineering). Donetsk. Publ. «RVA DonNTU», 2005, 350 p.

Authors: Sivokobylenko Vitalii Fedorovich (Donetsk, Ukraine) – Doctor Techn. Sci., Head of the Department «Electrical Power Stations», Donetsk National Technical University (DonNTU).

Tkachenko Sergei Nikolayevich (Donetsk, Ukraine) – Cand. Techn. Sci., Head of the German Technical Department DonNTU.

Derkachev Sergei Vladimirovich (Donetsk, Ukraine) – Ph. D. Student, DonNTU.

