

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАЧАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОЦЕНОК В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ

А.Ю. АФАНАСЬЕВ*, В.Г. МАКАРОВ**, В.Н. ХАННАНОВА**

*Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ

**Казанский национальный исследовательский технологический университет

С помощью компьютерного моделирования и исследования показана целесообразность и эффективность применения непрерывного градиентного метода поиска минимума функции для идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя и его нагрузки. Установлено, что предлагаемый метод обеспечивает высокую точность определения параметров, обладает устойчивостью и хорошей сходимостью при изменении начальных значений оценок параметров в широком диапазоне. Особую значимость имеет тот факт, что идентификация осуществляется даже при нулевых начальных значениях оценок параметров.

Ключевые слова: идентификация параметров, трехфазный асинхронный двигатель, обобщенная электрическая машина, градиентный метод поиска минимума функции

Введение

В работах [1 – 3] показана актуальность задачи идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя (АД) и ее особая значимость применительно к частотно-регулируемому электроприводу. Проведенный обзор показал, что одним из наиболее эффективных методов для решения задачи идентификации параметров электрических двигателей является непрерывный градиентный метод поиска минимума определено-положительной функции от невязок уравнений двигателя. Преимуществами этого метода является простота реализации и хорошая сходимость в окрестности экстремума. С учетом изложенного обоснована [1 – 5] целесообразность использования и показана эффективность применения непрерывного градиентного метода поиска минимума функции для идентификации параметров трехфазного АД и его нагрузки. При этом к параметрам АД относятся пять параметров схемы замещения – активные сопротивления, индуктивности фаз обмоток статора и ротора, взаимная индуктивность, а к параметрам нагрузки – статический момент и момент инерции. На основе этого метода разработаны [4] алгоритм и математическая модель, с помощью которых проведено компьютерное моделирование процессов идентификации параметров трехфазного АД. Вопросы технической реализации данного алгоритма в виде устройства идентификации параметров трехфазного АД рассмотрены в [5]. Компьютерное моделирование в [4] проводилось для двигателя АИР80А6У2 при начальном отклонении оценок всех параметров от истинных значений на 50 и 75 % соответственно. Однако дальнейшие исследования показали, что непрерывный градиентный метод поиска минимума функции сохраняет работоспособность, высокую точность, устойчивость и эффективность и при более значительном начальном

отклонении оценок всех параметров от истинных значений. Результаты этого исследования приводятся в данной статье.

Методика исследования

Алгоритмы частотного регулирования скорости в большинстве случаев строятся с использованием математического описания и параметров обобщенной электрической машины (ОЭМ) [6, 7], поэтому при идентификации параметров целесообразно использовать систему уравнений ОЭМ на основе трехфазного АД [1 – 5, 8 – 10]. Система уравнений ОЭМ, записанная при условии, что все параметры являются истинными, будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1d} = R_{10}i_{1d} + L_{10} \frac{di_{1d}}{dt} + M_{mo} \frac{di_{2d}}{dt} - \omega_1(L_{10}i_{1q} + M_{mo}i_{2q}); \\ u_{1q} = R_{10}i_{1q} + L_{10} \frac{di_{1q}}{dt} + M_{mo} \frac{di_{2q}}{dt} + \omega_1(L_{10}i_{1d} + M_{mo}i_{2d}); \\ 0 = R_{20}i_{2d} + L_{20} \frac{di_{2d}}{dt} + M_{mo} \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_2(L_{20}i_{2q} + M_{mo}i_{1q}); \\ 0 = R_{20}i_{2q} + L_{20} \frac{di_{2q}}{dt} + M_{mo} \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_2(L_{20}i_{2d} + M_{mo}i_{1d}); \\ J_{\Sigma 0} \frac{d\omega}{dt} = p_{\Pi}(M_{\varepsilon} - M_{c0}); \\ M_{\varepsilon} = p_{\Pi}M_{mo}(i_{2d}i_{1q} - i_{2q}i_{1d}), \end{array} \right. \quad (1)$$

где u_{1d} , u_{1q} – напряжения фаз обмотки статора, В; i_{1d} , i_{1q} , i_{2d} , i_{2q} – токи фаз обмоток статора и ротора, А; R_1 , R_2 – активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора, Ом; L_1 , L_2 – индуктивности фаз обмоток статора и ротора, Гн; M_m – взаимная индуктивность между соосными фазами статора и ротора, Гн; J_{Σ} – суммарный момент инерции подвижных частей, кг·м²; M_{ε} – электромагнитный момент, Н·м; M_c – статический момент, Н·м; ω_1 – угловая скорость вращения системы координат d, q , эл. рад/с; ω – угловая скорость вращения ротора, эл. рад/с; ω_2 – угловая скорость скольжения ($\omega_2 = \omega_1 - \omega$), эл. рад/с; p_{Π} – число пар полюсов; индексами $_0$ обозначены истинные значения параметров.

Оценки параметров условимся обозначать: R_1 , L_1 , R_2 , L_2 , M_m , J_{Σ} и M_c . В идеальном случае оценки и истинные значения параметров должны совпадать, однако оценки в произвольный момент времени отличаются от истинных значений параметров. В связи с этим появляются отклонения, именуемые невязками:

$$\Delta u_{1d} = R_1i_{1d} + L_1 \frac{di_{1d}}{dt} + M_m \frac{di_{2d}}{dt} - \omega_1(L_1i_{1q} + M_mi_{2q}) - u_{1d}; \quad (2)$$

$$\Delta u_{1q} = R_1i_{1q} + L_1 \frac{di_{1q}}{dt} + M_m \frac{di_{2q}}{dt} + \omega_1(L_1i_{1d} + M_mi_{2d}) - u_{1q}; \quad (3)$$

$$\Delta u_{2d} = R_2i_{2d} + L_2 \frac{di_{2d}}{dt} + M_m \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_2(L_2i_{2q} + M_mi_{1q}); \quad (4)$$

$$\Delta u_{2q} = R_2i_{2q} + L_2 \frac{di_{2q}}{dt} + M_m \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_2(L_2i_{2d} + M_mi_{1d}); \quad (5)$$

$$\Delta M = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + p_{\Pi} M_c - p_{\Pi}^2 M_m (i_{2d} i_{1q} - i_{2q} i_{1d}). \quad (6)$$

Введем функции невязок:

$$V_{u_1} = \frac{1}{2} [(\Delta u_{1d})^2 + (\Delta u_{1q})^2]; \quad V_{u_2} = \frac{1}{2} [(\Delta u_{2d})^2 + (\Delta u_{2q})^2]; \quad V_M = \frac{1}{2} (\Delta M)^2.$$

Невязки в процессе идентификации должны стремиться к нулю, а функции невязок должны быть минимизированы.

Систему дифференциальных уравнений относительно оценок параметров, согласно непрерывному градиентному методу поиска минимума функции или, иначе говоря, скорости изменения оценок параметров, запишем в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dR_1}{dt} &= -\mu_{R_1} \frac{\partial V_{u_1}}{\partial R_1} = -\mu_{R_1} \left[\frac{\partial V_{u_1}}{\partial \Delta u_{1d}} \frac{\partial \Delta u_{1d}}{\partial R_1} + \frac{\partial V_{u_1}}{\partial \Delta u_{1q}} \frac{\partial \Delta u_{1q}}{\partial R_1} \right] = \\ &= -\mu_{R_1} [\Delta u_{1d} i_{1d} + \Delta u_{1q} i_{1q}] ; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dL_1}{dt} &= -\mu_{L_1} \frac{\partial V_{u_1}}{\partial L_1} = -\mu_{L_1} \left[\frac{\partial V_{u_1}}{\partial \Delta u_{1d}} \frac{\partial \Delta u_{1d}}{\partial L_1} + \frac{\partial V_{u_1}}{\partial \Delta u_{1q}} \frac{\partial \Delta u_{1q}}{\partial L_1} \right] = \\ &= -\mu_{L_1} \left[\Delta u_{1d} \frac{di_{1d}}{dt} + \Delta u_{1q} \frac{di_{1q}}{dt} \right] ; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_2}{dt} &= -\mu_{R_2} \frac{\partial V_{u_2}}{\partial R_2} = -\mu_{R_2} \left[\frac{\partial V_{u_2}}{\partial \Delta u_{2d}} \frac{\partial \Delta u_{2d}}{\partial R_2} + \frac{\partial V_{u_2}}{\partial \Delta u_{2q}} \frac{\partial \Delta u_{2q}}{\partial R_2} \right] = \\ &= -\mu_{R_2} [\Delta u_{2d} i_{2d} + \Delta u_{2q} i_{2q}] ; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dL_2}{dt} &= -\mu_{L_2} \frac{\partial V_{u_2}}{\partial L_2} = -\mu_{L_2} \left[\frac{\partial V_{u_2}}{\partial \Delta u_{2d}} \frac{\partial \Delta u_{2d}}{\partial L_2} + \frac{\partial V_{u_2}}{\partial \Delta u_{2q}} \frac{\partial \Delta u_{2q}}{\partial L_2} \right] = \\ &= -\mu_{L_2} \left[\Delta u_{2d} \frac{di_{2d}}{dt} + \Delta u_{2q} \frac{di_{2q}}{dt} \right] ; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dM_m}{dt} &= -\mu_{M_m} \left[\frac{\partial V_{u_1}}{\partial M_m} + \frac{\partial V_{u_2}}{\partial M_m} + \lambda \frac{\partial V_M}{\partial M_m} \right] = \\ &= -\mu_{M_m} \left[\frac{\partial V_{u_1}}{\partial \Delta u_{1d}} \frac{\partial \Delta u_{1d}}{\partial M_m} + \frac{\partial V_{u_1}}{\partial \Delta u_{1q}} \frac{\partial \Delta u_{1q}}{\partial M_m} + \frac{\partial V_{u_2}}{\partial \Delta u_{2d}} \frac{\partial \Delta u_{2d}}{\partial M_m} + \frac{\partial V_{u_2}}{\partial \Delta u_{2q}} \frac{\partial \Delta u_{2q}}{\partial M_m} + \lambda \Delta M \frac{\partial \Delta M}{\partial M_m} \right] = \\ &= -\mu_{M_m} \left[\Delta u_{1d} \left(\frac{di_{2d}}{dt} - \omega_1 i_{2q} \right) + \Delta u_{1q} \left(\frac{di_{2q}}{dt} + \omega_1 i_{2d} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \Delta u_{2d} \left(\frac{di_{1d}}{dt} - \omega_2 i_{1q} \right) + \Delta u_{2q} \left(\frac{di_{1q}}{dt} + \omega_2 i_{1d} \right) - \lambda \Delta M p_{\Pi}^2 (i_{2d} i_{1q} - i_{2q} i_{1d}) \right] ; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{dJ_{\Sigma}}{dt} = -\mu_{J_{\Sigma}} \frac{\partial V_M}{\partial J_{\Sigma}} = -\mu_{J_{\Sigma}} \frac{d\omega}{dt} \Delta M ; \quad (12)$$

$$\frac{dM_c}{dt} = -\mu_M \frac{\partial V_M}{\partial M_c} = -\mu_M p_{\Pi} \Delta M, \quad (13)$$

где μ_{R_1} , μ_{L_1} , μ_{R_2} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , $\mu_{J_{\Sigma}}$, μ_M – положительные коэффициенты, определяющие скорости изменения оценок параметров; λ – весовой коэффициент, определяющий относительное влияние функций невязок V_{u_1} , V_{u_2} , V_M .

Величины коэффициентов μ_{R_1} , μ_{L_1} , μ_{R_2} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , $\mu_{J_{\Sigma}}$, μ_M выбираются в соответствии с рекомендациями, приведенными в [4, 5], таким образом, чтобы обеспечить сходимость процессов идентификации с учетом характера сигналов $i_{1d}(t)$, $i_{1q}(t)$, $i_{2d}(t)$, $i_{2q}(t)$, $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$ и производных $\frac{di_{1d}(t)}{dt}$, $\frac{di_{1q}(t)}{dt}$, $\frac{di_{2d}(t)}{dt}$, $\frac{di_{2q}(t)}{dt}$, $\frac{d\omega(t)}{dt}$.

Таким образом, система уравнений (1) представляет собой математическую модель объекта идентификации, а уравнения (2) – (6) в совокупности с уравнениями (7) – (13) – математическую модель системы идентификации параметров обобщенной машины R_1 , L_1 , R_2 , L_2 , M_m , J_{Σ} и M_c .

Основные результаты

С использованием математического описания обобщенной машины (1), системы уравнений (2) – (6) и уравнений (7) – (13) проведено компьютерное моделирование процессов идентификации параметров ОЭМ на основе двигателя типа АИР80А6У2. Моделирование проводилось при условии, что напряжение $u_{1d}(t)$ равно нулю, а напряжение $u_{1q}(t)$ и угловая скорость $\omega_1(t)$ изменяются в соответствии с временными диаграммами, представленными на рис. 1. Параметры функций $u_{1q}(t)$ и $\omega_1(t)$ приведены в табл. 1.

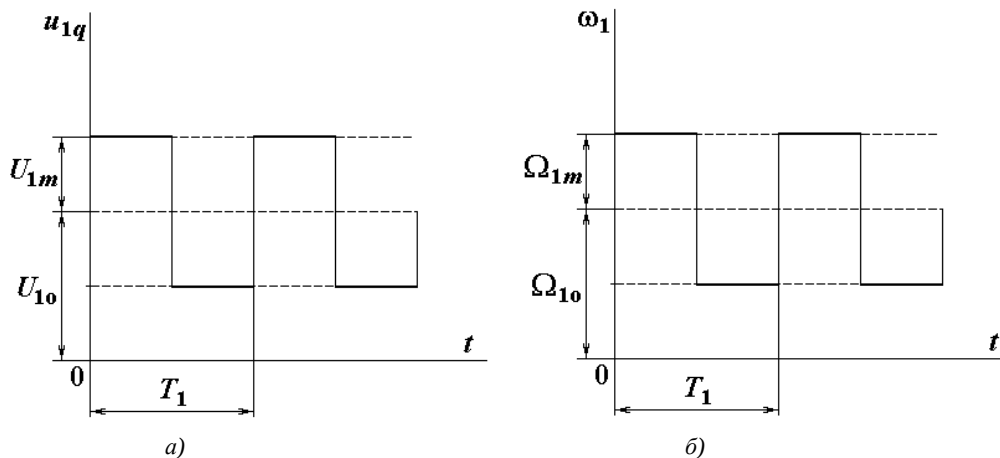


Рис. 1. Временные диаграммы функций $u_{1q}(t)$ и $\omega_1(t)$

Компьютерное моделирование процессов идентификации в работе [4] проводилось при начальном отклонении оценок всех параметров от истинных значений на 50 и 75 %. Отметим, что в каждом из рассматриваемых случаев начальные отклонения оценок параметров R_2 , J_{Σ} и M_c принимались на 50 и 75 % меньше

истинных значений, а начальные отклонения оценок параметров R_1, L_1, L_2, M_m – на 50 и 75 % больше истинных значений. Полученные результаты компьютерного моделирования процессов идентификации параметров ОЭМ на основе двигателя АИР80А6У2 [4], при начальных отклонениях оценок параметров от истинных значений на 75 %, показаны на рис. 2.

Таблица 1

Параметры функций $u_{1q}(t)$ и $\omega_1(t)$

Наименование параметров		Функция	
		$u_{1q}(t)$	$\omega_1(t)$
Постоянная составляющая	обозначение	U_{10}	Ω_{10}
	величина, единица измерения	50 В	300 рад/с
Амплитуда переменной составляющей	обозначение	U_{1m}	Ω_{1m}
	величина, единица измерения	25 В	150 рад/с
Частота переменной составляющей	обозначение	f_1	f_1
	величина, единица измерения	0,318 Гц	0,318 Гц

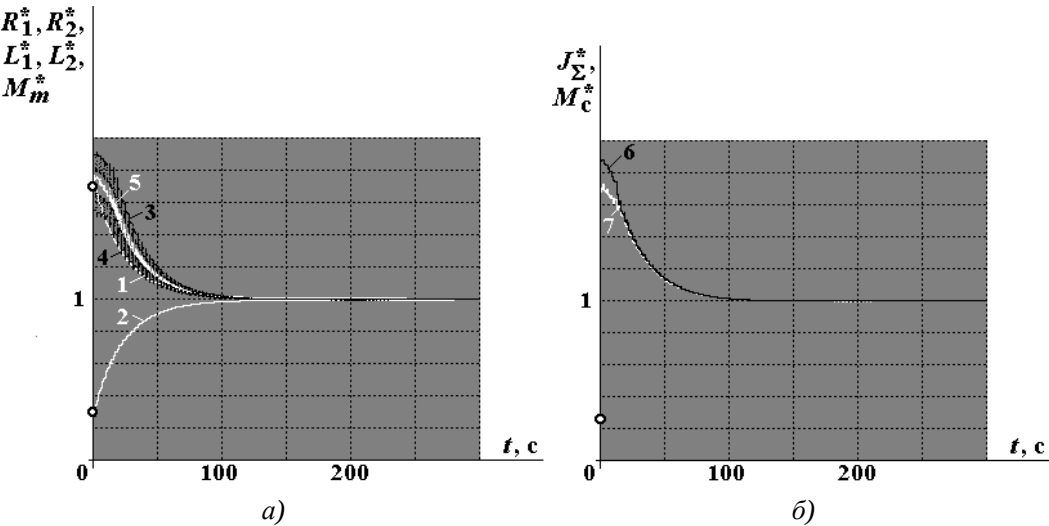


Рис. 2. Процессы идентификации при начальных отклонениях оценок всех параметров от истинных значений на 75 %:
а – параметры обмоток статора и ротора ОЭМ;
б – параметры нагрузки ОЭМ

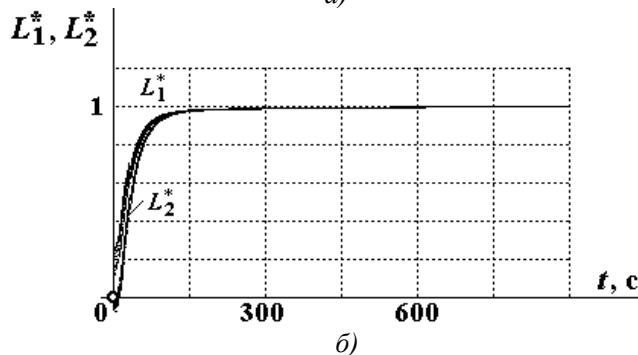
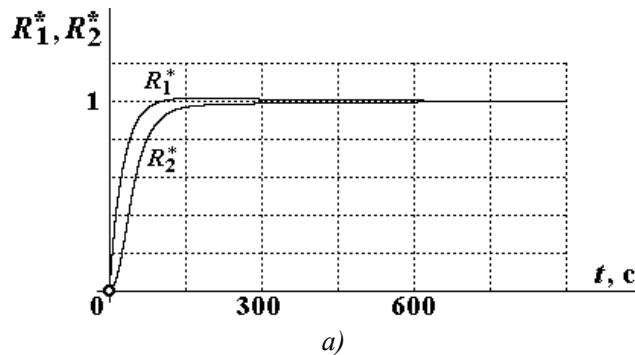
Для графического представления результатов идентификации на рис. 2 введены относительные оценки параметров, которые обозначены цифрами от 1 до 7 и определяются следующими соотношениями:

$$1 - R_1^* = \frac{R_1}{R_{10}}; \quad 2 - L_1^* = \frac{L_1}{L_{10}}; \quad 3 - R_2^* = \frac{R_2}{R_{20}}; \quad 4 - L_2^* = \frac{L_2}{L_{20}};$$

$$5 - M_m^* = \frac{M_m}{M_{m0}}; \quad 6 - J_\Sigma^* = \frac{J_\Sigma}{J_{\Sigma 0}}; \quad 7 - M_c^* = \frac{M_c}{M_{c0}}.$$

Начальные отклонения оценок параметров на рис. 2 отмечены точками. Длительность процессов идентификации оценивалась по времени достижения относительными оценками всех параметров значений $\pm 0,5\%$ от истинных. В соответствии с данными, полученными в [4], при начальном отклонении оценок параметров на 50 % длительность процессов идентификации составила 143 с, а при начальном отклонении на 75 % – 209 с.

Дальнейшее исследование процессов идентификации проводилось при нулевых начальных значениях оценок параметров. Следует отметить, что с точки зрения теории ОЭМ такое сочетание параметров противоречит физическому смыслу и приводит к нарушению структуры уравнений. Результаты компьютерного моделирования процессов идентификации параметров ОЭМ на основе двигателя АИР80А6У2 при нулевых начальных значениях оценок параметров показаны на рис. 3, 4. Здесь так же, как и на рис. 2, используются относительные оценки параметров, а начальные значения оценок параметров отмечены точками. Из рис. 3, 4 видно, что длительность процессов идентификации, оцениваемая по времени достижения относительными оценками всех параметров значений $\pm 0,5\%$ от истинных, при нулевых начальных значениях оценок параметров составила 553 с.



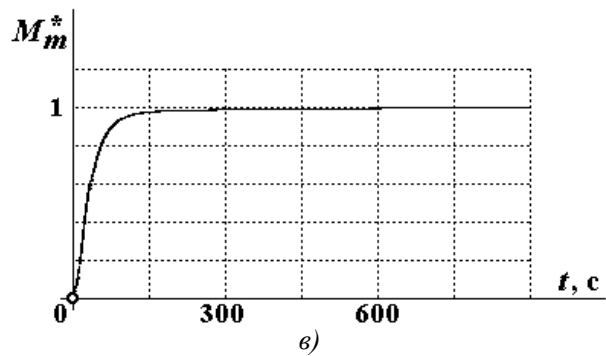


Рис. 3. Процессы идентификации при нулевых начальных значениях оценок параметров:

a – активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора;

b – индуктивности фаз обмоток статора и ротора;

c – взаимная индуктивность

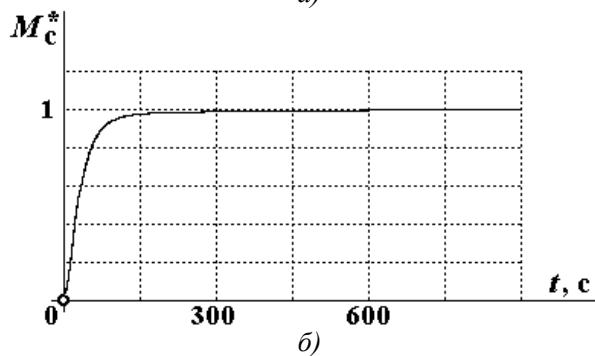
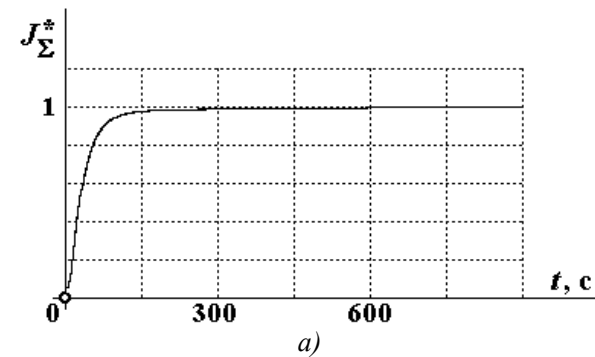


Рис. 4. Процессы идентификации при нулевых начальных значениях оценок параметров:

a – момент инерции; b – статический момент

Из рис. 2 – 4 видно, что при изменении начальных значений оценок параметров в широком диапазоне процессы идентификации имеют хорошую сходимость к истинным значениям и являются устойчивыми. После завершения процессов идентификации кривые $R_1^*(t)$, $L_1^*(t)$, $R_2^*(t)$, $L_2^*(t)$, $M_m^*(t)$, $J_\Sigma^*(t)$ и $M_c^*(t)$ выходят на уровень, соответствующий единице. Это свидетельствует о достижении всеми параметрами значений, близких к истинным. Количественная оценка точности результатов идентификации приведена в табл. 2.

Ранее было показано, что время и характер процессов идентификации определяются величинами коэффициентов μ_{R_1} , μ_{L_1} , μ_{R_2} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , μ_{J_Σ} , μ_M . Следует отметить, что для идентификации при нулевых начальных значениях оценок параметров АД не требуется осуществлять перенастройку системы идентификации – значения коэффициентов μ_{R_1} , μ_{L_1} , μ_{R_2} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , μ_{J_Σ} , μ_M и λ принимались такими же, как и для идентификации при начальном отклонении оценок параметров на 50 и 75 % [4, 5].

Таблица 2

Оценка точности результатов идентификации

Наименование параметров, единицы измерения	Обозначение	Относительная погрешность идентификации		
		При начальных отклонениях параметров от истинных значений		при нулевых начальных значениях оценок параметров
		на 50 %	на 75 %	
Активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом	R_1	0,4947 %	0,4562 %	0,5000 %
Индуктивность фазы обмотки статора, Гн	L_1	0,1508 %	0,3458 %	0,3970 %
Активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом	R_2	0,5000 %	0,5000 %	0,4791 %
Индуктивность фазы обмотки ротора, Гн	L_2	0,0637 %	0,4043 %	0,4846 %
Взаимная индуктивность, Гн	M_m	0,1335 %	0,3860 %	0,4512 %
Момент инерции подвижных частей, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	J_Σ	0,1217 %	0,3774 %	0,4423 %
Статический момент, $\text{Н} \cdot \text{м}$	M_c	0,1426 %	0,3930 %	0,4583 %
Длительность процессов идентификации, с	$t_{\text{и}}$	142,64	208,87	553,27

С помощью компьютерного моделирования проводилось исследование влияния величины весового коэффициента λ на характер переходных процессов идентификации, а также их устойчивость. Установлено, что, как при начальных отклонениях оценок всех параметров от истинных значений на 50 и 75 %, так и при нулевых начальных значениях оценок параметров, величина весового коэффициента λ не оказывает определяющего влияния на характер процессов идентификации АД и их устойчивость. Кроме того, установлено, что в каждом из рассматриваемых вариантов

идентификация осуществляется даже при λ равном нулю, а сами процессы идентификации продолжают оставаться устойчивыми. При этом отсутствие пятого слагаемого в уравнении (7) можно рассматривать как наличие постоянно действующего возмущения.

Обсуждение результатов

На основании результатов компьютерного моделирования можно утверждать, что непрерывный градиентный метод поиска минимума функции и разработанный на его основе алгоритм обеспечивают эффективность, устойчивость и высокую точность идентификации при изменении начальных значений оценок параметров АД в широком диапазоне. Особую значимость имеет тот факт, что идентификация осуществляется даже при нулевых начальных значениях оценок параметров. Следовательно, идентификация параметров АД непрерывным градиентным методом поиска минимума функции возможна не только при значительном начальном отклонении параметров от истинных значений, но и при отсутствии исходной информации. Кривые переходных процессов на рис. 2 – 4 свидетельствуют об устойчивости и сходимости процессов идентификации при различных сочетаниях параметров. Согласно данным табл. 2 идентификация осуществляется с высокой точностью.

Выводы

1) Для эффективного управления асинхронным двигателем, работающим в составе частотно-регулируемого электропривода, необходимо осуществлять оценку (идентификацию) текущих значений параметров схемы замещения фазы и нагрузки. Идентификацию целесообразно проводить с использованием непрерывного градиентного метода поиска минимума функции.

2) На основании непрерывного градиентного метода поиска минимума функции разработана математическая модель системы идентификации следующих параметров АД и его нагрузки: активных сопротивлений и индуктивностей фаз обмоток статора и ротора, взаимной индуктивности, суммарного момента инерции подвижных частей и статического момента.

3) Компьютерное моделирование и исследование позволило установить возможность и высокую точность идентификации параметров асинхронного двигателя как при начальных отклонениях всех параметров от истинных значений на 50 и 75 %, так и при нулевых начальных значениях оценок параметров. Длительность процессов идентификации в каждом из рассмотренных случаев составила 143; 209 и 553 с при относительной погрешности всех оценок не более $\pm 0,5$ % от истинных значений.

4) Для непрерывного градиентного метода поиска минимума функции нулевые начальные значения оценок являются нежелательным сочетанием параметров. Однако метод сохраняет устойчивость и обладает сходимостью к истинным значениям параметров. Кроме того, при нулевых начальных значениях оценок параметров асинхронного двигателя не требуется перенастройка параметров системы идентификации – значения коэффициентов μ_{R_1} , μ_{L_1} , μ_{R_2} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , μ_{J_Σ} , μ_M и λ принимались такими же, как и для идентификации при начальном отклонении оценок параметров на 50 и 75 %.

Summary

The expediency and effectiveness of the continuous gradient method of search of a minimum of function for identifying the parameters of three phase asynchronous motor and its load is shown using computer modeling and research. It is established that the proposed method provides high accuracy of determining the parameters, robustness and

good convergence when changing the initial values of the parameter estimates in a wide range. Of particular significance is the fact that identification is carried out even at zero initial values of the parameter estimates.

Keywords: *Identification of parameters, Asynchronous Three-Phase Motor, Generalised Electric Machine, Gradient a method of search of a minimum of function.*

Литература

1. Макаров В. Г., Яковлев Ю. А. Оценка параметров трехфазного асинхронного двигателя // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 9. С. 418–425.
2. Макаров В. Г., Яковлев Ю. А. Анализ состояния и перспективы развития работ по идентификации параметров электрических машин // Вестник Казанского технологического университета. 2011. Т. 14. № 1. С. 134–144.
3. Макаров В. Г. Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения // Вестник Казанского технологического университета. 2011. Т. 14. № 6. С. 79–93.
4. Макаров В. Г. Идентификация параметров трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 3–4. С. 88–101.
5. Пат. 2392731 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/06. Устройство оценивания параметров электродвигателя/Макаров В. Г., Афанасьев А. Ю., Яковлев Ю. А.; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технологический университет. №2009118685/09; заявл. 18.05.2009; опубл. 20.06.2010, Бюл. № 17. 21 с.
6. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.
7. Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2006. 304 с.
8. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001. 327 с.
9. Ключев В. И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
10. Макаров В. Г. Применение теории обобщенной электрической машины к трехфазному асинхронному двигателю // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. № 11–12. С. 84–97.
11. Макаров В. Г. Гипотетическая физическая модель обобщенной электрической машины на основе трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 1–2. С. 94–108.

Поступила в редакцию

23 октября 2015 г.

Афанасьев Анатолий Юрьевич – д-р техн. наук, профессор Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ (КНИТУ-КАИ). Тел: 8(843) 236-56-53, 8-927-423-54-80. E-mail: afanasiev@electro.kstu-kai.ru.

Макаров Валерий Ганнадьевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и электротехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). Тел: 8(843) 231-41-27. E-mail: electroprivod@list.ru.

Ханнанова Вероника Николаевна – аспирант кафедры «Электропривод и электротехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). Тел: 8(987)0674017.