

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

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

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

**Казанский национальный исследовательский технологический университет

На основе непрерывного градиентного метода поиска минимума функции разработан алгоритм идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя. Компьютерное моделирование процессов идентификации позволило выявить существенный недостаток алгоритма – весьма значительное время идентификации. Предложен усовершенствованный вариант алгоритма, применение которого позволит создать адаптивную систему идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя.

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

Введение

На основании проведенного в работах [1–3] анализа методов идентификации параметров автоматических систем и электрических машин дана классификация методов идентификации, рассмотрены области их применения, а также достоинства и недостатки. Там же 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 идентификации параметров электрических двигателей является непрерывный градиентный метод поиска минимума определенно-положительной функции от невязок уравнений двигателя. Преимуществами непрерывного градиентного метода идентификации является простота реализации и хорошая сходимости в окрестности экстремума. С учетом изложенного обоснована целесообразность 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 непрерывного градиентного метода поиска минимума функции разработаны [4] алгоритм и математическая модель, с помощью которых проведено компьютерное моделирование процессов идентификации параметров трехфазного АД. Компьютерное моделирование подтвердило работоспособность, высокую точность, устойчивость и эффективность предлагаемого метода идентификации и разработанного на его основе алгоритма. Следующим этапом развития работ в данном направлении явилась разработка в работе [5] устройства идентификации параметров (УИП) трехфазного АД, показаны его структурная и функциональная схемы. Здесь же показано, что устройство идентификации может быть реализовано с использованием простых элементов, таких

как перемножители, сумматоры и интеграторы. Следует отметить, что недостатком алгоритма идентификации [4] и разработанного на его основе устройства [5] является весьма значительное время идентификации. Так для двигателя АИР80А6У2 оно составило 143 и 209 с при начальном отклонении оценок всех параметров на 50 и 75 % соответственно. Для высокочастотных частотно-регулируемых электроприводов с АД такое время идентификации не всегда приемлемо. Решению задачи сокращения времени идентификации параметров АД посвящена эта статья.

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:

$$\begin{cases} u_{1d} = R_1 i_{1d} + L_1 \frac{di_{1d}}{dt} + M_m \frac{di_{2d}}{dt} - \omega_1 (L_1 i_{1q} + M_m i_{2q}); \\ u_{1q} = R_1 i_{1q} + L_1 \frac{di_{1q}}{dt} + M_m \frac{di_{2q}}{dt} + \omega_1 (L_1 i_{1d} + M_m i_{2d}); \\ 0 = R_2 i_{2d} + L_2 \frac{di_{2d}}{dt} + M_m \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_2 (L_2 i_{2q} + M_m i_{1q}); \\ 0 = R_2 i_{2q} + L_2 \frac{di_{2q}}{dt} + M_m \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_2 (L_2 i_{2d} + M_m i_{1d}); \\ J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = p_{\Pi} (M_{\Sigma} - M_c); \\ M_{\Sigma} = p_{\Pi} M_m (i_{2d} i_{1q} - i_{2q} i_{1d}), \end{cases} \quad (1)$$

где u_{1d} , u_{1q} – напряжения фаз обмотки статора; i_{1d} , i_{1q} , i_{2d} , i_{2q} – токи фаз обмоток статора и ротора; R_1 , R_2 – активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора; L_1 , L_2 – индуктивности фаз обмоток статора и ротора; M_m – взаимная индуктивность; J_{Σ} – суммарный момент инерции подвижных частей; M_{Σ} – электромагнитный момент; M_c – статический момент; ω_1 – угловая скорость вращения системы координат d, q ; ω – угловая скорость вращения ротора, эл. рад/с; ω_2 – угловая скорость скольжения ($\omega_2 = \omega_1 - \omega$); p_{Π} – число пар полюсов; индексами o 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:

$$\Delta u_{1d} = R_1 i_{1d} + L_1 \frac{di_{1d}}{dt} + M_m \frac{di_{2d}}{dt} - \omega_1 (L_1 i_{1q} + M_m i_{2q}) - u_{1d}; \quad (2)$$

$$\Delta u_{1q} = R_1 i_{1q} + L_1 \frac{di_{1q}}{dt} + M_m \frac{di_{2q}}{dt} + \omega_1 (L_1 i_{1d} + M_m i_{2d}) - u_{1q}; \quad (3)$$

$$\Delta u_{2d} = R_2 i_{2d} + L_2 \frac{di_{2d}}{dt} + M_m \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_2 (L_2 i_{2q} + M_m i_{1q}); \quad (4)$$

$$\Delta u_{2q} = R_2 i_{2q} + L_2 \frac{di_{2q}}{dt} + M_m \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_2 (L_2 i_{2d} + M_m i_{1d}); \quad (5)$$

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

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 согласно характеру сигналов $i_{1d}(t)$, $i_{1q}(t)$, $i_{2d}(t)$, $i_{2q}(t)$, $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$, производных $\frac{di_{1d}(t)}{dt}$, $\frac{di_{1q}(t)}{dt}$, $\frac{di_{2d}(t)}{dt}$, $\frac{di_{2q}(t)}{dt}$, $\frac{d\omega(t)}{dt}$ и общим требованиям к электроприводу.

Таким образом, система уравнений (1) представляет собой математическую модель объекта идентификации, а система уравнений (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} , 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, показанными на рис. 1. Параметры функций $u_{1q}(t)$ и $\omega_1(t)$ приведены в табл. 1.

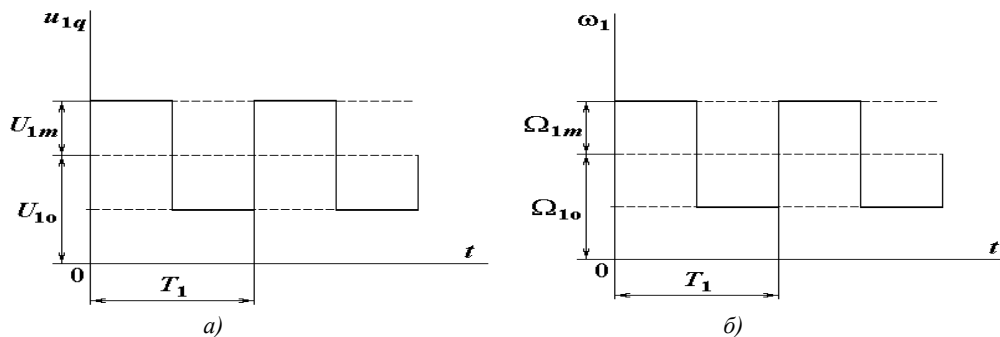


Рис. 1. Временные диаграммы функций: а) $u_{1q}(t)$; б) $\omega_1(t)$

Компьютерное моделирование процессов идентификации проводилось [4] 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, а начальные отклонения оценок параметров R_1 , L_1 , L_2 , M_m – на 50 и 75% больше истинных значений. Полученные в работе [4] результаты компьютерного моделирования процессов идентификации параметров ОЭМ на основе двигателя АИР80А6У2 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

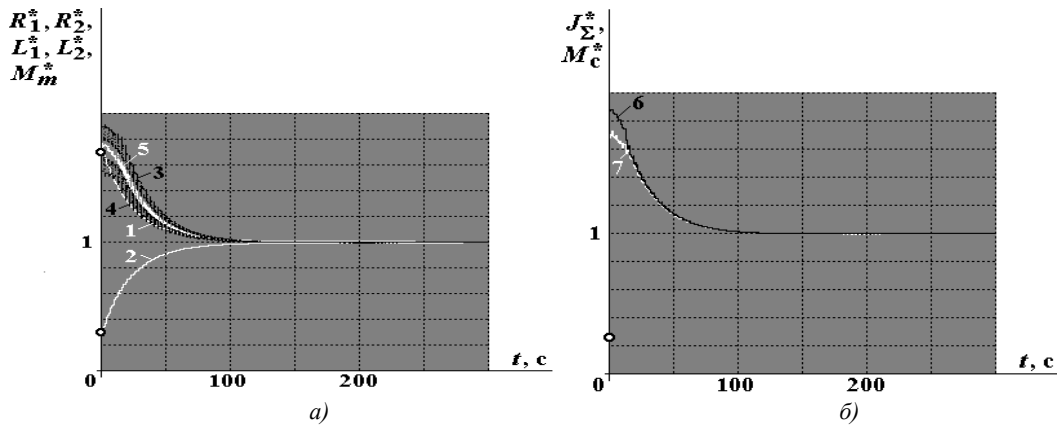


Рис. 2. Процессы идентификации при начальных отклонениях оценок всех параметров от истинных значений на 75 %: а) параметры обмоток статора и ротора ОЭМ; б) параметры нагрузки ОЭМ

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

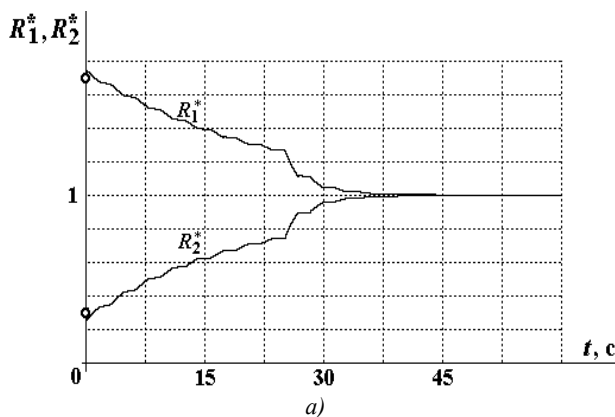
$$\begin{aligned}
 1 - R_1^* &= \frac{R_1}{R_{10}}; & 2 - L_1^* &= \frac{L_1}{L_{10}}; & 3 - R_2^* &= \frac{R_2}{R_{20}}; & 4 - L_2^* &= \frac{L_2}{L_{20}}; \\
 5 - M_m^* &= \frac{M_m}{M_{m0}}; & 6 - J_\Sigma^* &= \frac{J_\Sigma}{J_{\Sigma 0}}; & 7 - M_c^* &= \frac{M_c}{M_{c0}}.
 \end{aligned}$$

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 [4] длительность процессов идентификации при начальном отклонении оценок параметров на 50% составила 143 с, а при начальном отклонении на 75% – 209 с. Очевидно, что столь значительное время идентификации для многих высокочастотных частотно-регулируемых электроприводов с АД не всегда приемлемо. В связи с этим предлагается адаптивный алгоритм идентификации

параметров АД, разработанный на основе непрерывного градиентного метода поиска минимума функции.

Ранее было показано, что коэффициенты μ_{R_1} , μ_{L_1} , μ_{R_2} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , μ_{J_Σ} , μ_M определяют скорости изменения оценок параметров. Идея адаптивного алгоритма идентификации заключается в увеличении перечисленных коэффициентов после того, как становится очевидной сходимость процессов идентификации. Увеличение этих коэффициентов приведет к увеличению скорости протекания процессов идентификации. При этом увеличивать коэффициенты μ_{R_1} , μ_{L_1} , μ_{R_2} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , μ_{J_Σ} , μ_M можно как в функции времени, так и в функции значений относительных оценок параметров. В ходе проведенного исследования, как и в работе [4], осуществлялось компьютерное моделирование процессов идентификации параметров ОЭМ на основе двигателя АИР80А6У2 при начальных отклонениях всех параметров от истинных значений на 50 и 75%. При этом увеличение перечисленных коэффициентов производилось при вхождении оценок всех параметров в область ± 25 и $\pm 50\%$ от истинных значений соответственно. Результаты компьютерного моделирования процессов идентификации параметров ОЭМ на основе двигателя типа АИР80А6У2 с использованием адаптивного алгоритма при начальных отклонениях всех параметров от истинных значений на 75% показаны на рис. 3, 4. Здесь так же, как и на рис. 2, используются относительные оценки параметров, а начальные значения оценок параметров отмечены точками. Моделирование проводилось так, что на начальном этапе значения коэффициентов μ_{R_1} , μ_{L_1} , μ_{R_2} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , μ_{J_Σ} , μ_M задавались такими же, как в [4]. Из рис. 3, 4 видно, что через 25 с от начала моделирования в область $\pm 50\%$ от истинных значений входит последняя из относительных оценок – $\hat{L}_1^*$. В этот момент происходит увеличение коэффициентов μ_{L_1} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , μ_{J_Σ} и μ_M в 2 раза, а коэффициентов μ_{R_1} и μ_{R_2} – в 8 раз. В дальнейшем до конца моделирования значения этих коэффициентов не изменяются.

Значения коэффициентов идентификации μ_{R_1} , μ_{L_1} , μ_{R_2} , μ_{L_2} , μ_{M_m} , μ_{J_Σ} , μ_M в работе [4] выбирались таким образом, чтобы обеспечить приблизительно равные скорости изменения оценок всех параметров. Исходя из аналогичных соображений осуществлялся выбор кратности увеличения значений этих коэффициентов в адаптивной системе идентификации. Поэтому рекомендации по выбору значений коэффициентов и кратности их увеличения в адаптивной системе можно считать универсальными.



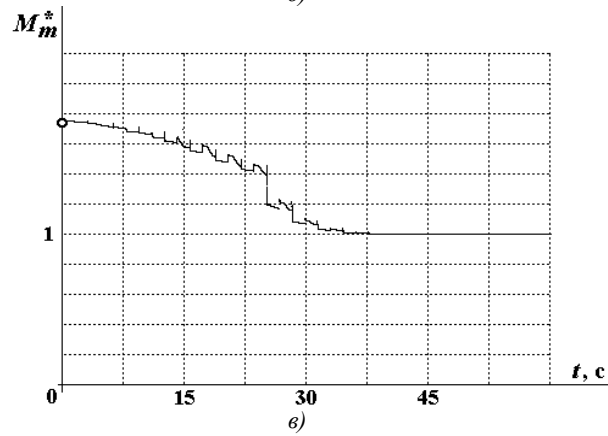
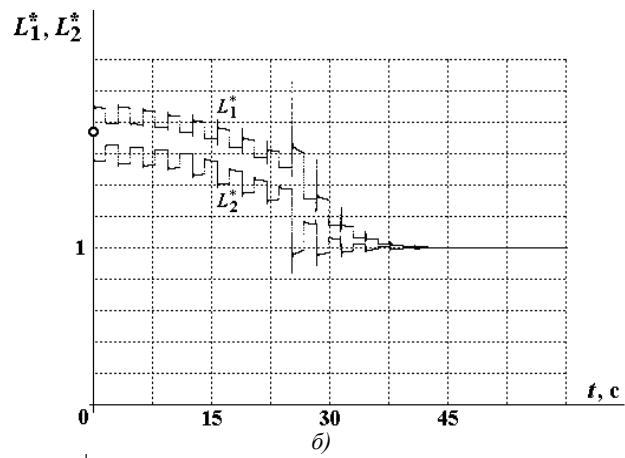
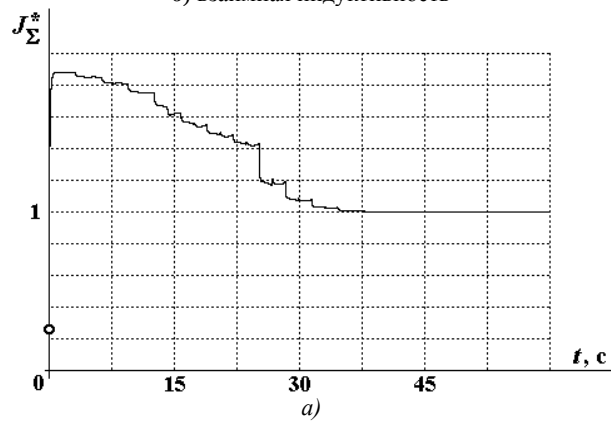


Рис. 3. Процессы идентификации при использовании адаптивного алгоритма и начальных отклонениях оценок всех параметров от истинных значений на 75 %:

$a)$ активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора;

$\delta)$ индуктивности фаз обмоток статора и ротора;

$\epsilon)$ взаимная индуктивность



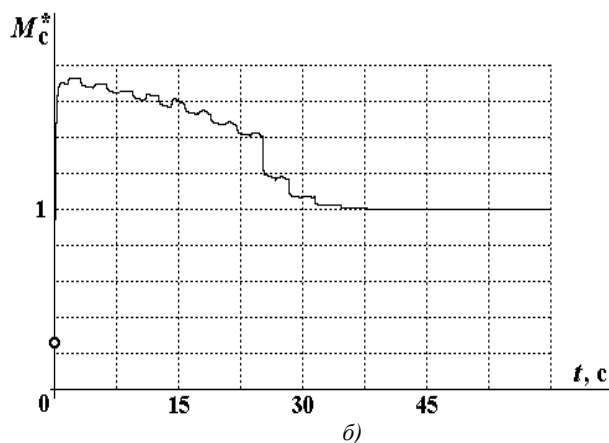


Рис. 4. Процессы идентификации при использовании адаптивного алгоритма и начальных отклонениях оценок всех параметров от истинных значений на 75 %:
а) момент инерции; б) статический момент

Длительность процессов идентификации с использованием адаптивного алгоритма при начальном отклонении оценок всех параметров от истинных значений на 50% составила 36 с, а при начальном отклонении на 75% – 42 с.

Количественная оценка точности результатов идентификации приведена в табл. 2.

Таблица 2

Оценка точности результатов идентификации

Наименование параметров, единицы измерения	Обозначение	Относительная погрешность идентификации, %, при начальном отклонении параметров от истинных значений			
		без адаптивного алгоритма		с адаптивным алгоритмом	
		на 50%	на 75%	на 50%	на 75%
Активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом	R_1	0,4947	0,4562	0,0296	0,4161
Индуктивность фазы обмотки статора, Гн	L_1	0,1508	0,3458	0,2081	0,2691
Активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом	R_2	0,5000	0,5000	0,1183	0,2932
Индуктивность фазы обмотки ротора, Гн	L_2	0,0637	0,4043	0,4907	0,3541
Взаимная индуктивность, Гн	M_m	0,1335	0,3860	0,3240	0,0982
Момент инерции подвижных частей, кг · м ²	J_Σ	0,1217	0,3774	0,2722	0,0905
Статический момент, Н · м	M_c	0,1426	0,3930	0,2354	0,1551
Длительность процессов идентификации, с	$t_{и}$	142,64	208,87	36,131	42,412

В процессе исследования установлено, что расширение областей ± 25 и $\pm 50\%$ от истинных значений, при начальных отклонениях всех параметров от истинных значений на 50 и 75% соответственно, приводит к нарушению устойчивости и сходимости процессов идентификации, а уменьшение этих областей – к увеличению длительности процессов идентификации.

С помощью компьютерного моделирования проводилось исследование влияния величины весового коэффициента λ на характер переходных процессов идентификации, а также их устойчивость. Установлено, что при начальных отклонениях оценок всех параметров от истинных значений на 50 и 75% величина весового коэффициента λ не оказывает определяющего влияния на характер процессов идентификации АД и их устойчивость. Кроме того установлено, что идентификация осуществляется даже при λ , равном нулю, а сами процессы идентификации продолжают оставаться устойчивыми. При этом отсутствие пятого слагаемого в уравнении (11) можно рассматривать как наличие постоянно действующего возмущения.

Обсуждение результатов

На основании результатов компьютерного моделирования можно утверждать, что непрерывный градиентный метод поиска минимума функции обеспечивает эффективность, устойчивость, высокую точность идентификации, а разработанный на его основе адаптивный алгоритм позволяет существенно сократить длительность процессов идентификации параметров АД. Так при начальных отклонениях всех параметров от их истинных значений на 50% длительность процессов идентификации уменьшается в 3,95 раза, а при начальных отклонениях на 75% – в 4,92 раза. Кривые переходных процессов на рис. 3, 4 свидетельствуют об устойчивости и сходимости процессов идентификации при использовании адаптивного алгоритма. Анализ данных табл. 2 показывает, что применение адаптивного алгоритма позволяет не только сократить длительность процессов идентификации, но и повысить точность определения следующих параметров: R_1 , L_1 , R_2 , M_m , J_Σ и M_c .

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 параметров трехфазного асинхронного двигателя целесообразно проводить с использованием непрерывного градиентного метода поиска минимума функции.

2) Значительная длительность процессов идентификации с использованием непрерывного градиентного метода поиска минимума функции для многих высокودинамичных частотно-регулируемых электроприводов с асинхронными двигателями не всегда приемлема. В связи с этим предлагается использовать адаптивный алгоритм идентификации параметров, разработанный на основе непрерывного градиентного метода поиска минимума функции.

3) Компьютерное моделирование подтвердило работоспособность, высокую точность, устойчивость и эффективность использования адаптивного алгоритма идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя. Установлено, что применение адаптивного алгоритма идентификации при начальных отклонениях всех параметров от их истинных значений на 50% позволяет уменьшить длительность процессов идентификации в 3,95 раза, а при начальных отклонениях на 75% – в 4,92 раза.

Summary

On the basis of the continuous gradient a method of search of a minimum of function the algorithm of identification of parameters of three-phase asynchronous motor is developed. Computer modeling of processes of identification allowed to reveal essential drawback of the algorithm - a very considerable time of identification. We propose an improved variant of the algorithm, the use of which will create an adaptive system for the identification of parameters of asynchronous three-phase motor.

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

Литература

1. Макаров В.Г., Яковлев Ю.А. Оценивание 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 / В.Г. Макаров, А.Ю. Афанасьев, Ю.А. Яковлев; 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.

Поступила в редакцию

25 ноября 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 Геннадьевич – 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.

Яковлев Юрий Алексеевич – аспирант кафедры «Электропривод и электротехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). Тел: 8(927)4025895.

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