

УДК 622.313.33

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ РАБОТЫ

Каширских Вениамин Георгиевич,
доктор техн. наук, профессор, e-mail: kvg,ea@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Аннотация. В статье рассматриваются косвенные методы определения параметров и переменных величин асинхронных электродвигателей в процессе их работы. Актуальность этого вопроса определяется необходимостью совершенствования асинхронных электроприводов промышленных установок для повышения их эффективности, функциональной надежности и промышленной безопасности. Это особенно актуально, например, для угледобывающей отрасли, где электроприводы горных машин, являющихся ключевыми элементами технологического процесса, работают в тяжелых условиях эксплуатации при случайном характере резко переменных нагрузок, с частыми перегрузками и пусками под нагрузкой. Одним из наиболее предпочтительных в настоящее время направлений совершенствования электроприводов является использование современных информационных технологий и вычислительных средств. Применение методов оценивания позволяет в реальном времени вычислять текущие значения параметров и переменных величин асинхронного электродвигателя, которые затем могут быть использованы в системе управления электропривода с признаком ей новых возможностей, а также для использования в подсистемах диагностики и защиты электропривода от аварийных режимов. Рассмотрена возможность оценивания параметров и переменных величин асинхронного двигателя на основе рекуррентного метода наименьших квадратов, расширенного фильтра Калмана и поискового метода оценивания. Работа вычислительных алгоритмов базируется на использовании математической модели двигателя и информации, содержащейся в измеряемых фазных токах и напряжениях статора. Приведены некоторые результаты исследования, позволяющие рекомендовать рассмотренные методы для практических приложений.

Ключевые слова: электропривод, асинхронный электродвигатель, электромагнитные параметры, динамическая идентификация, оценивание параметров.

В настоящее время основная тенденция совершенствования асинхронных электроприводов заключается в широком использовании современных технических средств и информационных технологий, позволяющих на основании получаемой от асинхронных электродвигателей (АД) достоверной информации правильно управлять состоянием электроприводов для выполнения заданных технологических процессов. Под состоянием АД понимается некоторая совокупность его координат, в качестве которых могут быть использованы параметры, выходные и промежуточные переменные величины, и их производные, которые изменяются во времени в функции от входных воздействий. При работе АД его параметры (активные и индуктивные сопротивления статора и ротора) и переменные состояния (потокосцепления, частота вращения ротора, момент вращения и др.) в разной степени изменяются и зависят, в основном, от режима нагружения и температурного состояния двигателя. По этой причине значения параметров АД, которые приводятся в каталогах, не могут быть использованы для управления, защиты и диагностики, поскольку являются расчетными. Следовательно, для получения достоверной информации требуется проводить непрерывный во време-

ни мониторинг параметров и переменных величин АД. При этом основная проблема заключается в том, что во время работы АД их очень трудно или невозможно измерить, поэтому возникает необходимость в косвенном нахождении значений, например, путем оценивания.

Научные исследования в данном направлении в течение ряда лет проводятся на кафедре электропривода и автоматизации КузГТУ. Для проведения мониторинга разработаны методы динамической идентификации АД и программное обеспечение для их реализации. Динамическая идентификация представляет собой вычислительную процедуру оценивания параметров и переменных состояния АД в реальном времени (в процессе работы двигателя) на основе использования математической модели двигателя, математических методов оценивания и информации, содержащейся в измеряемых фазных токах и напряжениях статора. Получены положительные результаты, часть из которых приведена в данной статье.

Актуальность рассматриваемого вопроса подтверждается большим количеством публикаций в технической литературе по этой теме [1-6] и др., где приводятся научные результаты по оцениванию отдельных параметров или комбинации па-

раметров АД. Нашей задачей является оценивание всего комплекса параметров и переменных состояния АД на единой технической основе, которые можно было бы использовать в разных сочетаниях для различных практических приложений (управление, защита, диагностика, прогнозирование и др.). При этом должна обеспечиваться низкая чувствительность к уровню различных шумов в измерительной системе и к их статистическим характеристикам, а также устойчивость вычислительных процессов при оценивании. При решении данной задачи использовалась теоретическая база, приведенная в [7-11].

Используемая при исследованиях математическая модель АД в комплексном виде состоит из совокупности следующих уравнений:

$$\begin{aligned} U_1 &= I_1 R_1 + \dot{\Psi}_1 + j\omega_k \Psi_1; \\ 0 &= I_2 R_2 + \dot{\Psi}_2 + j(\omega_k - p\omega_r) \Psi_2; \\ M &= p \operatorname{Im}(\Psi_1^* I_1); \\ \dot{\omega}_r &= \frac{1}{J}(M - M_c); \\ \Psi_1 &= I_1 L_1 + I_2 L_m; \quad \Psi_2 = I_2 L_2 + I_1 L_m; \\ L_1 &= L_m + L_{1\sigma}; \\ L_2 &= L_m + L_{2\sigma}, \end{aligned}$$

где $U_1, U_2, I_1, I_2, \Psi_1, \Psi_2$ – соответственно векторы напряжений, токов и потокосцеплений обмоток статора и ротора; ω_k, ω_r – угловые частоты вращения координатных осей и ротора; R_1, R_2, L_1, L_2 – активные сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора; L_m – индуктивность цепи намагничивания; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; M – электромагнитный момент; M_c – момент сопротивления на валу; J – момент инерции ротора; p – число пар полюсов.

Индексы 1,2 обозначают, соответственно, принадлежность параметра или переменной к статору и ротору, а индекс (*) показывает, что вектор является сопряженным. Обмотка ротора является приведенной к обмотке статора. Принятые в модели допущения соответствуют стандартным. Эта модель получена на основе уравнений двухфазной обобщенной электрической машины (ОЭМ) [12-17]. Она широко применяется и обеспечивает необходимую точность при решении различных теоретических и практических задач [18-21].

При проведении динамической идентификации хорошие результаты были получены с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК) и расширенного фильтра Калмана (РФК). При этом использовались математические модели состояния и цепи измерения АД, алгоритмы и программное обеспечение для оценивания каждой компоненты вектора параметров и переменных состояния отдельно для статического и динамического режимов работы, поскольку в этих

режимах в измеренных значениях напряжений и токов содержится разное количество информации о параметрах и переменных состояния. Определение степени динамичности режима производится с помощью численного критерия, учитывающего мощность первой гармоники потокосцепления статора.

Математические модели состояния и цепи измерения для статических режимов были получены на основе анализа физических процессов в АД и использования информации, содержащейся в измеряемых фазных напряжениях и токах статора и частоте вращения ротора. Из-за существенной громоздкости эти модели здесь не приводятся.

В результате применения РМНК и РФК с использованием полученной совокупности математических моделей состояния и цепи измерения АД для статического режима работы была проведена динамическая идентификация с получением вектора параметров и состояния в виде:

$$\theta_s = [\Psi_1 \Psi_m \Psi_2 R_2 L_{1\sigma} L_2 L_m]^T.$$

В отличие от статического режима, динамический режим АД является более информативным и позволяет одновременно определять частоту вращения и активное сопротивления ротора. Динамическая идентификация АД в этом случае основана на использовании РФК и измеренных фазных напряжениях и токах статора. При этом вектор параметров и переменных состояния имеет вид:

$\theta_d = [\Psi_{2\alpha} \Psi_{2\beta} \omega_r R_1 R_2 M_c]^T$. Остальные его компоненты вектора определяются на этапе предварительной идентификации на основе данных, полученных при пуске АД в холостую, в режиме холостого хода и при работе АД в статическом режиме.

Для определения текущего значения активного сопротивления статора разработан отдельный способ, в котором предусмотрено введение постоянных составляющих в фазные напряжения и обработкой данных, полученных измерительной системой, используемой при динамической идентификации АД [22]. Знание величины активного сопротивления статора позволяет вычислить величину потокосцепления статора [23]. Определение формы кривой намагничивания АД производится в режиме холостого хода на основе сопоставления во времени тока и потокосцепления статора [24]. Момент инерции ротора определялся известным способом на этапе предварительной идентификации.

Проверка разработанных методов, проведенная на лабораторном стенде и в производственных условиях на шахтах Кузбасса для ряда электродвигателей мощностью от 1,1 до 75 кВт, подтвердила их работоспособность и достаточную для практических целей точность. Для измеряемых параметров погрешность не превысила 10%. На рис. 1–4 приведены полученные процессы оценивания параметров электродвигателя 4A90L4Y3

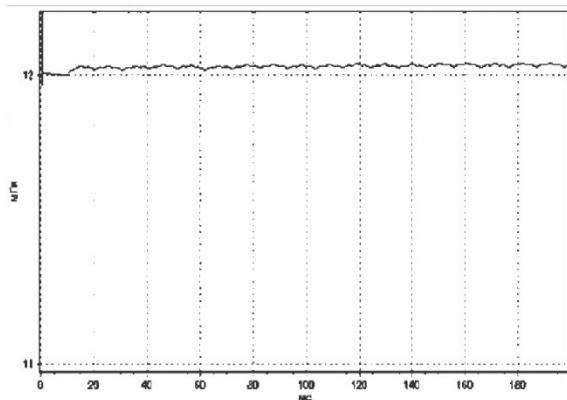


Рис. 1. Процесс оценивания индуктивности рассеяния статора

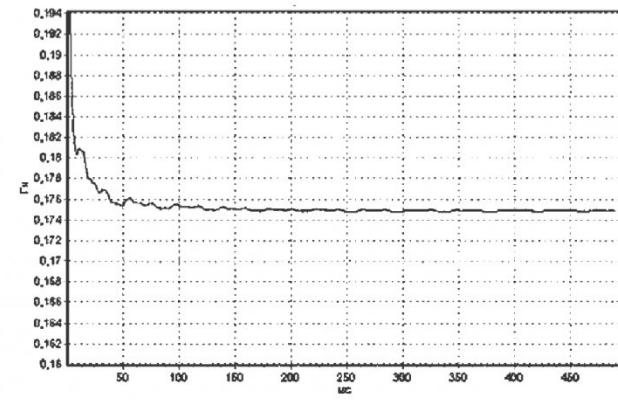


Рис. 2. Процесс оценивания индуктивности цепи намагничивания

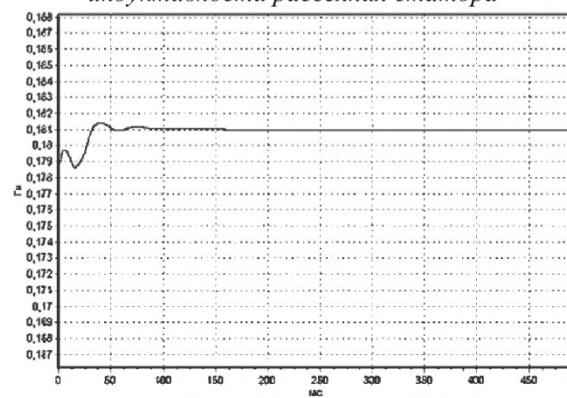


Рис. 3. Процесс оценивания индуктивности ротора

для статического режима работы, а на рис. 5 – для динамического режима (рис. 6 приведен для сравнения). На рис. 4 показаны два варианта процесса оценивания на основе РФК: 1 – при аналитическом решении исходного дифференциального уравнения, 2 – при аппроксимации уравнения на основе численного метода Эйлера.

В табл. 1 приведены сравнительные данные для ряда электродвигателей, работающих в статическом режиме. Обозначение R_2^* соответствует оценкам, полученным на основе РФК, а R_2 – на основе РМНК. Полученные оценки значительно ближе к измеренным данным, чем данные из ката-

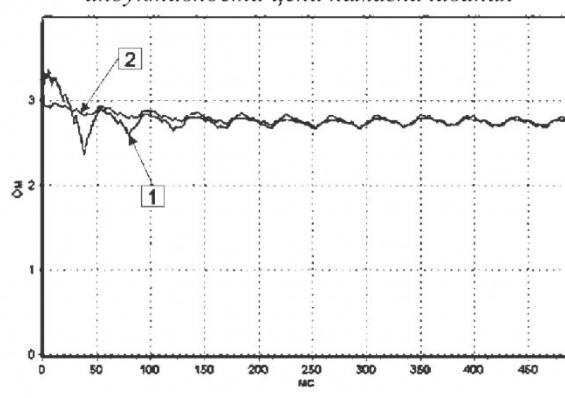


Рис. 4. Процесс оценивания активного сопротивления ротора

лога, которые являются расчетными.

Исследования показали, что из-за большей информативности токов и напряжений статора в динамическом режиме оценки получаются более точными, при этом относительная погрешность не превышает 3%. Таким образом, для определения текущих значений параметров и переменных АД в динамических режимах достаточно информации от датчиков, измеряющих фазные токи и напряжения статора. При работе АД в статическом режиме частота вращения ротора не может быть оценена, поэтому требуется ее измерение.

Таблица 1 – Сравнительные данные для асинхронных электродвигателей

Тип двигателя	Источник данных	Параметры					
		$L_{1\sigma}$	L_1	L_m	L_2	R_2	R_2^*
4A90L4У3	Каталог	0,010	0,303	0,263	0,311	2,63	
	Оценивание	0,012	0,189	0,175	0,181	2,71	2,75
	Измерение	-	0,202	-	-	-	-
4AM80A4СУ1	Каталог	0,01	0,444	0,434	0,465	5,5	
	Оценивание	0,01	0,285	0,275	0,282	5,0	5,0
	Измерение	-	0,270	-	-	-	-
4AMX90L2У3	Каталог	0,003	0,393	0,39	0,401	1,69	
	Оценивание	0,003	0,198	0,195	0,2	1,00	1,02
	Измерение	-	0,203	-	-	-	-
АИМ-М80В2У2.5	Каталог	-	-	-	-	-	-
	Оценивание	0,008	0,368	0,36	0,37	1,32	1,30
	Измерение	-	0,37	-	-	-	-

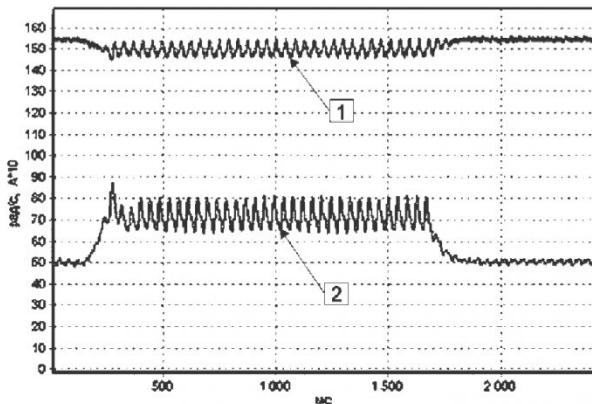


Рис. 5. Процесс оценивания частоты вращения ротора (1) и измеренный ток статора (2)

Для проведения динамической идентификации АД нами также был разработан поисковый метод, использующий информацию, содержащуюся только в измеряемых фазных токах и напряжениях статора. Метод также обладает низкой чувствительностью к статистическим характеристикам шумов в измерительной системе и имеет устойчивые процессы оценивания. При наличии локальных экстремумов в пространстве искомых параметров он позволяет находить глобальный экстремум. В основе метода лежит упрощенная математическая модель АД, в которой для определения потокосцеплений статора и ротора используются зависимости:

$$I_1 = \frac{\Psi_1 - K_2 \Psi_2}{L'_1}; I_2 = \frac{\Psi_2 - K_1 \Psi_1}{L'_2},$$

полученные из уравнений АД. Здесь K_1 , K_2 , L'_1 , L'_2 - соответственно коэффициенты электромагнитной связи и переходные индуктивности статора и ротора. Для упрощения модели принято, что $K_1 = K_2$, $L'_1 = L'_2$, поскольку величина индуктивности цепи намагничивания значительно больше индуктивностей рассеяния статора и ротора.

Для проверки допустимости данного упрощения было проведено моделирование процессов пуска и работы со статической и резко переменной нагрузкой, проведенное для ряда АД. При этом максимальная погрешность вычислений значений тока и потокосцепления ротора по упрощенной модели АД не превысила 5%.

При оценивании параметров и состояния в динамических режимах были использованы математическая модель состояния АД:

$$\dot{\Psi}_2 = -\frac{R_2}{L'_2}(\Psi_2 - K_1 \Psi_1) + j p \omega_r \Psi_2$$

и модель цепи измерения: $\Psi_1 = K_2 \Psi_2 + I_1 L'_1$. При этом модель АД была приведена к виду:

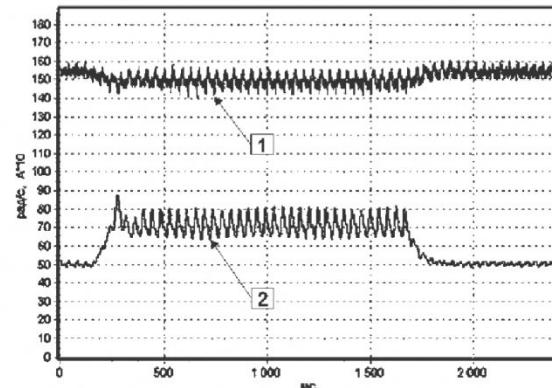


Рис. 6. Измеренные частота вращения ротора (1) и ток статора (2)

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u); \\ \hat{x} = [\hat{\Psi}_{2\alpha} \quad \hat{\Psi}_{2\beta} \quad \hat{\omega}_r \quad \hat{R}_2 \quad \hat{L}'_2 \quad \hat{K}_1]^T \\ u = [\Psi_{1\alpha} \quad \Psi_{1\beta} \quad I_{1\alpha} \quad I_{1\beta}]^T, \end{cases}$$

где \hat{x} - вектор оценок состояния и параметров, u - вектор входных воздействий.

Для выявления ошибки оценивания была использована векторная функция

$$h(x, u) = \Psi_2 = \frac{(\Psi_1 - \hat{L}'_1 I_1)}{\hat{K}_2},$$

а также соответствующая ей функция $h(\hat{x}, u) = \hat{\Psi}_2$, определяющая ту же величину, но полученную из вектора оценок состояния и параметров.

В качестве целевой функции была использована зависимость:

$$\begin{aligned} Q(\Delta z) &= Q(h(x, u) - h(\hat{x}, u)) = \\ &= \sum_{i=0}^N (|\Psi_2[i] - \hat{\Psi}_2[i]|)^2. \end{aligned}$$

Из-за меньшей информативности токов и напряжений статора при идентификации АД в статических режимах размерность пространства поиска в этом случае была уменьшена. Для этого коэффициенты электромагнитной связи и переходные индуктивности статора и ротора были приняты постоянными. В этом случае изменяется алгоритм оценивания с изменением вектора оценок параметров и состояния АД:

$$\hat{x} = [\hat{\Psi}_{2\alpha} \quad \hat{\Psi}_{2\beta} \quad \hat{\omega}_r \quad \hat{R}_2]^T.$$

Компьютерное моделирование, проведенное для ряда электродвигателей, показало, что целевая функция является многоэкстремальной с наличием локальных минимумов. Для поиска глобально-го экстремума наилучшим оказался многомерный перебор в пространстве варьируемых параметров для локализации минимума с последующим использованием метода покоординатного спуска, для уточнения найденного экстремума.

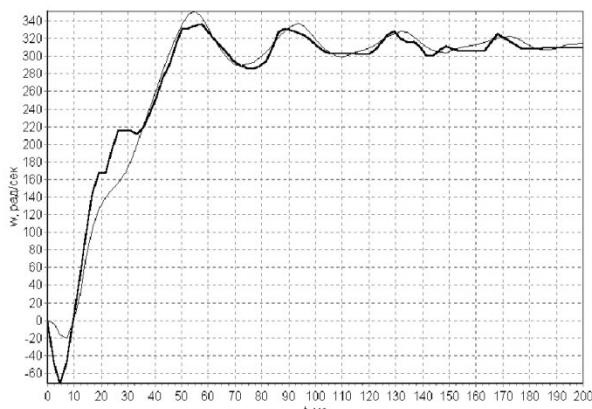


Рис. 7. Сравнение оцененной и измеренной (тонкая линия) частоты вращения ротора

На рис. 7 и рис. 8 представлены процессы оценивания значений активного сопротивления и частоты вращения ротора при пуске электродвигателя 4AMX90L2Y3. Полученные результаты близки к измеренным данным и данным, полученным нами с помощью других методов [22,23,25].

Сравнение параметров двигателя типа 4AMX90L2Y3, полученных разными способами, приведено в табл. 2. Величина индуктивности цепи намагничивания определялась из опыта холостого хода. Этап подготовки к динамической идентификации описан в [25]. При достаточно хорошем совпадении полученных оценок между собой и с измеренными данными, значения каталога также существенно отличаются от них. Результаты динамической идентификации АД на основе поискового метода, полученные для ряда электродвигателей, позволяют рекомендовать его для практического применения.

Для динамической идентификации АД нами был разработан еще один метод – на основе использования искусственной нейронной сети (ИНС). Этот метод позволяет в реальном времени определять величину потокосцепления статора и параметры ротора. Кроме того, на основе использования ИНС получены также положительные результаты для диагностики замыканий в обмотке статора и построения тепловой защиты АД.

Полученные теоретические и практические

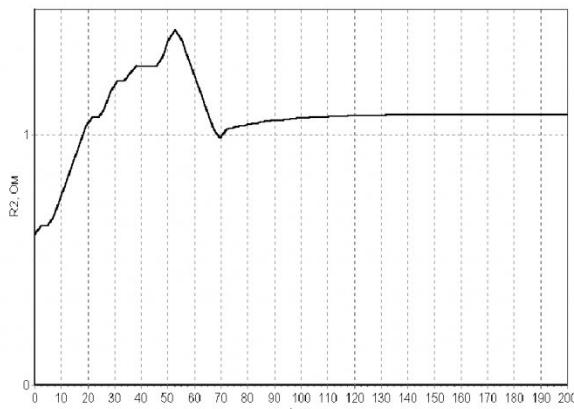


Рис. 8. Процесс оценивания активного сопротивления ротора

Таблица 2 – Сравнение данных, полученных разными способами

Способ получения	L_m	L'_1	R_2
На основе поисковых методов	0,19	0,012	1,08
На основе РФК	0,195	0,008	1,01
С помощью ИНС	-	0,0117	0,98
Измерение	0,193	-	-
Каталог	0,39	0,0175	1,64

результаты позволяют рекомендовать разработанные методы для мониторинга электромагнитных параметров (активные сопротивления и индуктивности статора и ротора) и переменных величин (потокосцепления статора и ротора, электромагнитный момент и частота вращения ротора), характеризующих состояние асинхронных двигателей в реальном времени. Итогом данной работы является разработанный нами информационно-вычислительный комплекс для асинхронных электроприводов [26]. Получаемая при мониторинге информация может быть использована не только для управления, защиты и диагностики асинхронных электроприводов, но и для проведения приемо-сдаточных испытаний АД на электромашиностроительных заводах с определением индивидуальных паспортных данных каждого АД, а также для контроля качества технологических процессов при их изготовлении или ремонте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Parameter Identification of a Mathematical Model of Induction Motors Via Least Square Technics / Alonge F., D'Ippolo F., BarberaLa.S., Raimondi F.M. // Proceedings of the 1998 IEEE Interniteanal Conference on Control Applications Trieste, Italy, 1-4 September 1998. - Pp. 491-496.
- Liu, Y., 2014. Multi-parameter Online Identification Algorithm of Induction Motor for Hybrid Electric Vehicle Applications. Parallel Architectures, Algorithms and Programming (PAAP), 2014 Sixth International Symposium, IEEE, pp: 35 - 39.
- Carraro, M. and M. Zigliotto, 2014. Automatic Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors at Standstill. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 61(9): 4605 - 4613.
- Fan, B., Z. Yang, W. Wei Xu and X. Wang, 2014. Rotor Resistance Online Identification of Vector Controlled Induction Motor Based on Neural Network. Mathematical Problems in Engineering, 2014.
- Liu J. Speed estimation of induction motor using a non-linear identification technique / Liu J., Kung I., Chao H. // Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A) Vol. 25, No. 2, 2001. - Pp. 107-114.

6. Chen Y. Embedded DSPs bring cost-effective high-performance solutions to appliance control // Electronic Engineering Times, 2 апр. 2001.-Pp. 78-82.
7. Эйхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. - М.: Мир, 1975.-687 с.
8. Mansouri, M.M., H.N. Nounou and M.N. Nounou, 2014. Nonlinear control and estimation in induction machine using state estimation techniques. Systems Science & Control Engineering, 2(1): 642-654.
9. Kojooyan-Jafari, H., L. Monjo, F. Corcoles and J. Pedra, 2014. Parameter Estimation of Wound-Rotor Induction Motors From Transient Measurements. EnergyConversion, IEEE Transactionson (issue 29 (2)), IEEE, pp: 300-308.
10. Справочник по теории автоматизированного управления / Под ред. А.А. Красовского.- М.: Наука, 1987. - 712 с.
11. Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление. - Наука, 1996. - 176 с.
12. Крон Г. Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. / Под ред. Л.Т. Кузина, П.Г. Кузнецова. - М.: Советское радио, 1978. - 720 с.
13. Ковач К. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. Ковач, И. Рац.-М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 744 с.
14. Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. - М.-Л.: Энергия, 1964.- 527 с.
15. Хэнкок Н. Матричный анализ электрических машин. - М.: Энергия, 1967. - 225 с.
16. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. - Киев: Наукова думка, 1979. - 205 с.
17. Ключев В.И. Теория электропривода. - М.: Энергоатомиздат, 2001. - 704 с.
18. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. - М.: Высшая школа, 2001. - 327 с.
19. Сипайлов Г.С. Математическое моделирование электрических машин / Г.С. Сипайлов, А.В. Лоос.-М.: Высшая школа, 1980. - 176 с.
20. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных электродвигателей. - М.: Энергоатомиздат, 1981. - 184 с.
21. Ещин Н.К. Модель асинхронного электродвигателя в системе электроснабжения / Электротехника, 2002. - № 1. - С. 40-43.
22. ПАТЕНТ РФ № 2406096 C1. Способ определения активного сопротивления статора асинхронного двигателя / В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский, А.Н. Гаргаев. Заявл. 20.11.2009 №2009143046/28. Опубл. 10.12.10. Бюл. № 34.
23. ПАТЕНТ РФ № 2439599 C1. Способ определения потокосцепления статора асинхронного двигателя / В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский, А.Н. Гаргаев. Заявл. 16.11.2010 №2010146668/28. Опубл. 10.01.12. Бюл. 1.
24. Каширских В.Г. Определение кривой намагничивания магнитопровода асинхронного электродвигателя по результатам испытания на холостом ходе / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов, Д.В. Соколов // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2002. - № 2.- С. 14-16.
25. Каширских В.Г. Этап подготовки к динамической идентификации асинхронных электродвигателей / В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский // Вестник КузГТУ, 2006. - № 2. - С. 39-41.
26. Каширских В.Г. Структура информационно-вычислительного комплекса для асинхронных электроприводов / В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский, А.П. Носков // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2012.- № 4.- С. 139-141.

Поступило в редакцию 14.07.2015

UDC 622.313.33

ON-LINE PARAMETERS ESTIMATION OF AN INDUCTION MOTORS

Kashirskikh Veniamin G.,
Dr. Sc. (Engineering), professor, e-mail: kvg.ea@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation T.F.

Abstract:Indirect methods of on-line parameters and variables estimation of induction motors are considered. Relevance of this question is defined by need of improvement of induction motor drives for increase of their efficiency, functional reliability and industrial safety. It is especially actual, for coal-mining industry, where electric drives of the mining equipment work under heavy-load conditions with random loads, frequent overloading and load starts. One of the most preferable directions of improvement of electric drives is use of modern information technologies and computing machinery. Application of estimation methods allows to calculate the current values of induction motor parameters which then can be used in an electric drive control system, also in an subsystems of diagnostics and protection of the electric drive against emergency operation in real time. Possibility of induction motor parameters and variables estimation on the basis of the recursive least squares method, the expanded Kalman filter and a search algorithm is considered. Work of computing algo-

rithms is based on use of induction motor's mathematical model and information containing in the measured currents and stator voltages. Some results of research allowing to recommend the considered methods for practical applications are provided.

Keywords: electric drive, induction motor, electromagnetic parameters, dynamic identification, parameters estimation.

REFERENCES

1. Parameter Identification of a Mathematical Model of Induction Motors Via Least Square Technics / Alonge F., D'Ippolo F., BarberaLa.S., Raimondi F.M. // Proceedings of the 1998 IEEE Interniteanal Conference on Control Applications Trieste, Italy, 1-4 September 1998. - Pp. 491-496.
2. Liu, Y., 2014. Multi-parameter Online Identification Algorithm of Induction Motor for Hybrid Electric Vehicle Applications. Parallel Architectures, Algorithms and Programming (PAAP), 2014 Sixth International Symposium, IEEE, pp: 35 - 39.
3. Carraro, M. and M. Zigliotto, 2014. Automatic Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Mo-tors at Standstill. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 61(9): 4605 - 4613.
4. Fan, B., Z. Yang, W. Wei Xu and X. Wang, 2014. Rotor Resistance Online Identification of Vector Controlled Induction Motor Based on Neural Network. Mathematical Problems in Engineering, 2014.
5. Liu J. Speed estimation of induction motor using a non-linear identification technique / Liu J., Kung I., Chao H. // Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A) Vol. 25, No. 2, 2001. - Pp. 107-114.
6. Chen Y. Embedded DSPs bring cost-effective high-performance solutions to appliance control // Elec-tronic Engineering Times, 2 apr. 2001.-Pp. 78-82.
7. Jejkhoff P. Osnovy identifikacii sistem upravlenija. Ocenivanie parametrov i sostojanija. - M.: Mir, 1975.-687 s.
8. Mansouri, M.M., H.N. Nounou and M.N. Nounou, 2014. Nonlinear control and estimation in induction machine using state estimation techniques. Systems Science & Control Engineering, 2(1): 642-654.
9. Kojooyan-Jafari, H., L. Monjo, F. Corcoles and J. Pedra, 2014. Parameter Estimation of Wound-Rotor Induction Motors From Transient Measurements. EnergyConversion, IEEE Transactionson (issue 29 (2)), IEEE, pp: 300-308.
10. Spravochnik po teorii avtomatizirovannogo upravlenija / Pod red. A.A. Krasovskogo.- M.: Nau-ka, 1987. - 712 s.
11. Li R. Optimal'nye ocenki, opredelenie harakteristik i upravlenie. - Nauka, 1996. - 176 s.
12. Kron G. Tenzornyyj analiz setej: Per. s angl. / Pod red. L.T. Kuzina, P.G. Kuznecova. - M.: So-vetskoe radio, 1978. - 720 s.
13. Kovach K. Perehodnye processy v mashinah peremennogo toka / K. Kovach, I. Rac.-M.-L.: Gosjenergoizdat, 1963. - 744 s.
14. Uajt D. Jelektromehanicheskoe preobrazovanie jenergii / D. Uajt, G. Vudson. - M.-L.: Jenergija, 1964.-527 s.
15. Hjenkok N. Matrichnyj analiz jeklektricheskikh mashin. - M.: Jenergija, 1967. - 225 s.
16. Fil'c R.V. Matematicheskie osnovy teorii jeklektromehanicheskikh preobrazovatelej. - Kiev: Naukova dumka, 1979. - 205 s.
17. Kljuchev V.I. Teorija jeklektroprivoda. - M.: Jenergoatomizdat, 2001. - 704 s.
18. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie jeklektricheskikh mashin. - M.: Vysshaja shkola, 2001. - 327 s.
19. Sipajlov G.S. Matematicheskoe modelirovanie jeklektricheskikh mashin / G.S. Sipajlov, A.V. Lo-os.-M.: Vysshaja shkola, 1980. - 176 s.
20. Petrov L.P. Upravlenie puskom i tormozheniem asinhronnyh jeklektroprivatelej. - M.: Jenergo-atomizdat, 1981. - 184 s.
21. Eshhin N.K. Model' asinhronnogo jeklektroprivatela v sisteme jeklektrosnabzhenija / Jeklektrotehni-ka, 2002. - № 1. - S. 40-43.
22. PATENT RF № 2406096 S1. Sposob opredelenija aktivnogo soprotivlenija statora asinhronno-go dvigatelja / V.G. Kashirskih, A.V. Nesterovskij, A.N. Gargaev. Zajavl. 20.11.2009 №2009143046/28. Opubl. 10.12.10. Bjul. 34.
23. PATENT RF № 2439599 S1. Sposob opredelenija potokoscepljenija statora asinhronnogo dviga-telja / V.G. Kashirskih, A.V. Nesterovskij, A.N. Gargaev. Zajavl. 16.11.2010 №2010146668/28. Opubl. 10.01.12. Bjul. № 1.
24. Kashirskih V.G. Opredelenie krivoj namagnichivaniya magnitoprovoda asinhronnogo jeklektro-dvigatelja po rezul'tatam ispytanija na holostom hode / V.G. Kashirskih, V.M. Zav'jalov, D.V. Sokolov // Vestnik KuzGTU, 2002. - № 2.- S. 14-16.
25. Kashirskih V.G. Jetap podgotovki k dinamicheskoj identifikacii asinhronnyh jeklektroprivatelej / V.G. Kashirskih, A.V. Nesterovskij // Vestnik KuzGTU, 2006. - № 2. - S. 39-41.
26. Kashirskih V.G. Struktura informacionno-vychislitel'nogo kompleksa dlja asinhronnyh jeklektroprivodov / V.G. Kashirskih, A.V. Nesterovskij, A.P. Noskov // Vestn. KuzGTU, 2012.- № 4.- S. 139-141.