

типов данных, основанный на комбинировании базовых механизмов текстового поиска методом N -грамм и нечетких запросов. Показано, что алгоритмы нечеткого текстового поиска и нечетких запросов для нахождения записей в реляционных базах данных систем мониторинга не эффективны, поскольку таблицы содержат поля различных типов, в том числе строковые и численные типы, а также

значения «дата/время». Применительно к строковым значениям наиболее результативным является алгоритм нечеткого текстового поиска на базе метрики Левенштейна–Дамерау, поиск численных значений, в которые можно преобразовать поля «дата-время», целесообразно осуществлять с помощью нечетких запросов, основанных на теории нечетких множеств Лотфи Заде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вирт Н. Алгоритмы и структуры данных. — М.: Мир, 1989. — 360 с.
2. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Сортировка и поиск. 2-е изд. — М.: Вильямс, 2007. — Т. 3. — 824 с.
3. Макконел Дж. Основы современных алгоритмов. 2-е изд. — М.: Техносфера, 2004. — 368 с.
4. Карахтанов Д.С. Использование алгоритмов нечеткого поиска при решении задач обработки массивов данных в интересах кредитных организаций // Аудит и финансовый анализ. — 2010. — № 2. URL: www.auditfin.com/2010/2/toc.asp (дата обращения: 15.05.2012).
5. Бойцов Л.М. Классификация и экспериментальное исследование современных алгоритмов нечеткого словарного поиска // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Труды VI Всеросс. научн. конф. (RCDL'2004). — Пушкино, Россия, 2004. URL: <http://rcdl.ru/doc/2004/paper27.pdf> (дата обращения: 20.05.2012).
6. Карахтанов Д.С. Использование алгоритмов нечеткого поиска при решении задачи устранения дубликатов в массивах данных // Молодой ученый. — 2010. — Т. 1. — № 8 (19). — С. 150–155.
7. Потапов Е.Н. Нечеткие множества в хранилище данных. 2011. URL: <http://разработка-хл.рф/blog/?p=346> (дата обращения: 01.05.2012).
8. Рыжов А.П. Модели поиска информации в нечеткой среде. — М.: Изд-во ЦПИ при ММФ МГУ, 2004. — 96 с.

Поступила 14.09.2012 г.

УДК 621.313.333:62–83

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С НЕПОДВИЖНЫМ КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ НА ОСНОВЕ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ

А.С. Глазырин, Е.В. Боловин

Томский политехнический университет
E-mail: asglazyrin@tpu.ru

Разработан метод идентификации параметров динамических моделей асинхронных электродвигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе решения системы разностных уравнений. Для цифрового дифференцирования применялась многоточечная аппроксимация первых и вторых производных. Были определены с допустимой погрешностью параметры модели асинхронного двигателя. Доказана работоспособность и эффективность динамической идентификации при использовании разработанного метода.

Ключевые слова:

Асинхронный двигатель, идентификация параметров, разностные схемы.

Key words:

Induction motor, parameters identification, difference schemes.

Введение

Современное производство не может обойтись без электропривода. В электроприводах применяются различные двигатели как по структуре и назначению, так и по возрастной категории. Эффективное управление данными двигателями возможно лишь, если известны текущие значения их параметров. Но зачастую определить параметры либо невозможно, либо крайне сложно. Соответственно, остро встает вопрос об идентификации параметров электродвигателей.

Под идентификацией модели в общем случае понимают определение структуры и ее параметров путем анализа входных и выходных сигналов, по-

даваемых на модель объекта. Основное требование, предъявляемое к процедуре динамической идентификации параметров, является получение несмещённых оценок, стремящихся к истинным значениям искомых параметров. Исходя из этого требования, значительный интерес представляют методы, основанные на решении разностных уравнений, описывающих динамику электродвигателей, или так называемые разностные схемы.

Цель представленной работы — разработать метод идентификации параметров асинхронного двигателя (АД) с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе разностных схем.

Динамическая идентификация параметров электродвигателей

Составим разностную схему для идентификации параметров АД с короткозамкнутым ротором. Согласно [1. С. 21–22] математическую модель двигателя при общеизвестных допущениях можно составить на основе уравнений проекций тока статора и потокосцепления ротора в неподвижной системе координат α, β

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\alpha} - \frac{R_{\Sigma}}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\alpha} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \\ + \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta} \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\beta} - \frac{R_{\Sigma}}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\beta} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\beta} + \\ + \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha} \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\alpha} - z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta} \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\beta} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\beta} + z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha} \\ M_{\Sigma M} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot i_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot i_{1\alpha}) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_{\Sigma M} - M_C), \end{cases} \quad (1)$$

где R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом; R'_2 – приведенное к статору активное сопротивление ротора, Ом; $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки статора, Гн; $L_2 = L'_{2\sigma} + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки ротора, Гн; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн; $L'_{2\sigma}$ – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн; L_m – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре машины, Гн;

$R_{\Sigma} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}$ – эквивалентное сопротивление двигателя, Ом; $U_{1\alpha} = U_{1m} \sin(2\pi f_1 t) = \sqrt{2} U_1 \sin(2\pi f_1 t)$ – синусоидальная составляющая напряжения статора по оси α ортогональной неподвижной системы координат α, β , В; $U_{1\beta} = U_{1m} \cos(2\pi f_1 t) = \sqrt{2} U_1 \cos(2\pi f_1 t)$ – косинусоидальная составляющая напряжения статора по оси β ортогональной неподвижной системы координат α, β , В; $U_{1m} = \sqrt{2} U_1$ – амплитудное значение фазного напряжения статорной обмотки, В; U_1 – действующее значение фазного напряжения статорной обмотки, В; f_1 – частота напряжения статора, Гц; $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ – составляющие тока статора в системе координат α, β , А; $\Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ – составляющие потокосцепления ротора в системе координат α, β , Вб; $M_{\Sigma M}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м; M_C – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения

двигателя, Н·м; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$ – коэффициент рассеяния; J – момент инерции двигателя, кг·м².

АД работает в составе частотно-регулируемого электропривода. Напряжение на две из трех обмоток подается от автономного инвертора напряжения с синусоидальной ШИМ-модуляцией. Ротор АД остается неподвижным $\omega = 0$ рад/с, так как отсутствует крутящий момент. Пульсациями тока, вызванными ШИМ-модуляцией, пренебрегаем, так как несущая частота модуляции много больше номинальной частоты тока.

Тогда (1) можно переписать в виде

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\alpha} - \frac{R_{\Sigma}}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\alpha} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + 0 \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\alpha} - 0. \end{cases} \quad (2)$$

В операторной форме записи система уравнений (2) принимает вид

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = R_{\Sigma} \cdot (T_{\Sigma} \cdot p + 1) \cdot i_{1\alpha} - \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} - 0 \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2\alpha} - L_m \cdot i_{1\alpha} - 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $T_{\Sigma} = \frac{\sigma L_1}{R_{\Sigma}}$ – эквивалентная постоянная времени;

ни; $T_2 = \frac{L_2}{R'_2}$ – постоянная времени ротора.

Выразив из второго уравнения системы (3) по-

токосцепление $\Psi_{2\alpha} = \frac{L_m i_{1\alpha}}{(T_2 p + 1)}$ и подставив в первое уравнение, получим

$$U_{1\alpha} = R_{\Sigma} \cdot (T_{\Sigma} \cdot p + 1) \cdot i_{1\alpha} - \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \frac{L_m \cdot i_{1\alpha}}{(T_2 \cdot p + 1)}.$$

Избавимся от постоянной времени T_2 в знаменателе

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} \cdot (T_2 \cdot p + 1) &= R_{\Sigma} \cdot (T_{\Sigma} \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1) \cdot i_{1\alpha} - \\ &- \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot L_m \cdot i_{1\alpha}; \\ U_{1\alpha} \cdot T_2 \cdot p + U_{1\alpha} &= \\ &= \left(R_{\Sigma} \cdot T_{\Sigma} \cdot T \cdot p^2 + R_{\Sigma} \cdot T_{\Sigma} \cdot p + \right. \\ &\left. + R_{\Sigma} \cdot T_2 \cdot p + R_{\Sigma} - \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot L_m \right) \cdot i_{1\alpha}. \end{aligned}$$

Учитывая, что $R_{\Sigma} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}$, получаем

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} \cdot T_2 \cdot p + U_{1\alpha} &= \\ &= \left(R_{\Sigma} \cdot T_{\Sigma} \cdot T \cdot p^2 + R_{\Sigma} \cdot T_{\Sigma} \cdot p + R_{\Sigma} \cdot T_2 \cdot p + \right. \\ &\left. + R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2} - \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot L_m \right) \cdot i_{1\alpha}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & U_{1\alpha} \cdot T_2 \cdot p + U_{1\alpha} = \\
 & = (R_3 \cdot T_3 \cdot T \cdot p^2 + R_3 \cdot T_3 \cdot p + R_3 \cdot T_2 \cdot p + R_1) \cdot i_{1\alpha}; \\
 & U_{1\alpha} + U_{1\alpha} \cdot T_2 \cdot p = \\
 & = R_1 \cdot i_{1\alpha} + R_3 \cdot (T_3 + T) \cdot p \cdot i_{1\alpha} + R_3 \cdot T_3 \cdot T \cdot p^2 \cdot i_{1\alpha},
 \end{aligned}$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования.

Для удобства выполнения дальнейших математических операций произведем замену параметров на коэффициенты $K_1 = R_1$, $K_2 = R_3(T_2 + T_3)$, $K_3 = R_3 T_2 T_3$

$$\begin{aligned}
 & U_{1\alpha} + T_2 \cdot \frac{dU_{1\alpha}(t)}{dt} = \\
 & = K_1 \cdot i_{1\alpha} + K_2 \cdot p \cdot \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} + K_3 \cdot \frac{d^2 i_{1\alpha}(t)}{dt^2}.
 \end{aligned}$$

Затем с учётом интервала Δt дискретизации по времени измерительной системы перейдём от дифференциального уравнения к системе разностных уравнений, записанных в матричном виде, относительно текущего t_i и предыдущих $t_{j-xk} = t_j - \Delta t k$ моментов времени при условии постоянства оценок параметров, где $x=0,1,2$; k – коэффициент задержки времени, выбираемый на основе [2]

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} U_{1\alpha_j} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_j \\ U_{1\alpha_{j-1k}} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-1k} \\ U_{1\alpha_{j-2k}} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-2k} \end{bmatrix} = \\
 & = \begin{bmatrix} i_{1\alpha_j} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_j & \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_j \\ i_{1\alpha_{j-1k}} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-1k} & \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-1k} \\ i_{1\alpha_{j-2k}} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-2k} & \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-2k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где i_{j-xk} – токи; $\left(\frac{di(t)}{dt} \right)_{j-xk}$ – первые производные

токов; $\left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-xk}$ – вторые производные токов;

U_{j-xk} – напряжения; $\left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-xk}$ – производные напряжений на $j, j-1k, j-2k$ шагах соответственно.

В рамках решения задачи, поставленной в данной статье, считаем известной постоянную времени T_2 . Для нахождения оценок параметров системы вычислим коэффициенты $\hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3$, решив систему уравнений (3) методом обратной матрицы

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \hat{K}_1 \\ \hat{K}_2 \\ \hat{K}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{1\alpha_j} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_j & \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_j \\ i_{1\alpha_{j-1k}} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-1k} & \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-1k} \\ i_{1\alpha_{j-2k}} & \left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-2k} & \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-2k} \end{bmatrix}^{-1} \times \\
 & \times \begin{bmatrix} U_{1\alpha_j} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_j \\ U_{1\alpha_{j-1k}} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-1k} \\ U_{1\alpha_{j-2k}} + T_2 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-2k} \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Цифровое дифференцирование

Цифровое дифференцирование является достаточно серьезной проблемой при идентификации параметров [3, С. 127–139]. В основном оно заключается в нахождении идеального метода замены алгебраических производных на специальную функцию, которая может включать в себя лишь значения тока и напряжения в определенные промежутки времени. При неправильной замене происходит смещение оценок или матрицы являются вырожденными, что приводит к недостоверным результатам идентификации.

В данной работе была выбрана следующая методика дифференцирования [4]:

$$\left(\frac{di_{1\alpha}}{dt} \right)_j = \frac{1}{12 \cdot \Delta t} (i_{1\alpha_{j-2}} - 8 \cdot i_{1\alpha_{j-1}} + 8 \cdot i_{1\alpha_{j+1}} - i_{1\alpha_{j+2}})$$

– многоточечная аппроксимация первой производной тока;

$$\left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_j = \frac{i_{1\alpha_{j-1}} - 2 \cdot i_{1\alpha_j} + i_{1\alpha_{j+1}}}{\Delta t^2}$$

– многоточечная аппроксимация второй производной тока;

$$\left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_j = \frac{1}{12 \cdot \Delta t} (U_{16_{j-2}} - 8 \cdot U_{16_{j-1}} + 8 \cdot U_{16_{j+1}} - U_{16_{j+2}})$$

– многоточечная аппроксимация первой производной напряжения.

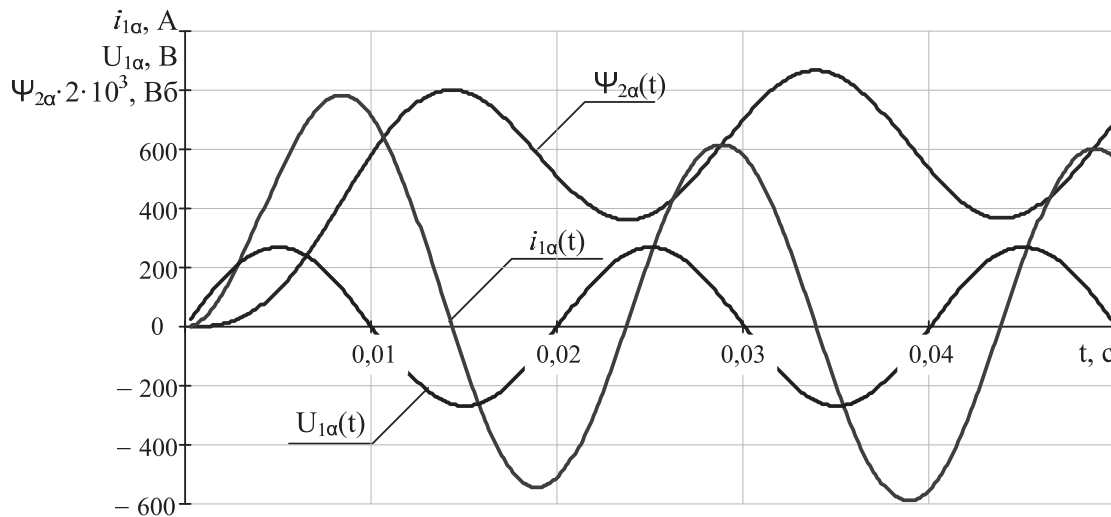


Рис. 1. Переходные процессы тока, напряжения и потокосцепления статора асинхронного двигателя с неподвижным короткозамкнутым ротором

Проверка метода идентификации на основе численного моделирования

Для проверки эффективности рассматриваемого метода идентификации параметров АД с неподвижным короткозамкнутым ротором с применением разработанного выше метода [5] при решении реальных задач проводилось исследование модели двигателя ST132L.

В ходе моделирования были получены переходные характеристики тока, напряжения и потокосцепления статора двигателя (рис. 1).

Построены процессы идентификации для коэффициентов $Kf_1 = \hat{K}_1$, $Kf_2 = \hat{K}_2$, $Kf_3 = \hat{K}_3$ (рис. 2) и проведено их сравнение с реальными значениями. Ошибки оценивания параметров K_1 , K_2 и K_3 равны 3,839, 3,798 и 0,003 % соответственно.

Полученные результаты идентификации параметров модели двигателя показали, что разница между реальными и оцененными значениями параметров составляют не более 4 %.

Выводы

1. Изучена возможность применения метода решения разностных уравнений при динамической идентификации параметров асинхронных двигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором.
2. При нахождении оценок параметров использован метод, основанный на разностных уравнениях, описывающих модель асинхронного двигателя с неподвижным короткозамкнутым ротором, при этом для организации процедуры идентификации необходимо всего два датчика: напряжения и тока, что является несомненным достоинством метода.
3. В ходе модельной апробации метода было выявлено, что погрешности расчета оценок не превышают 4 %, таким образом, процедура идентификации параметров реального асинхронно-

го двигателя методом обратной матрицы работоспособна.

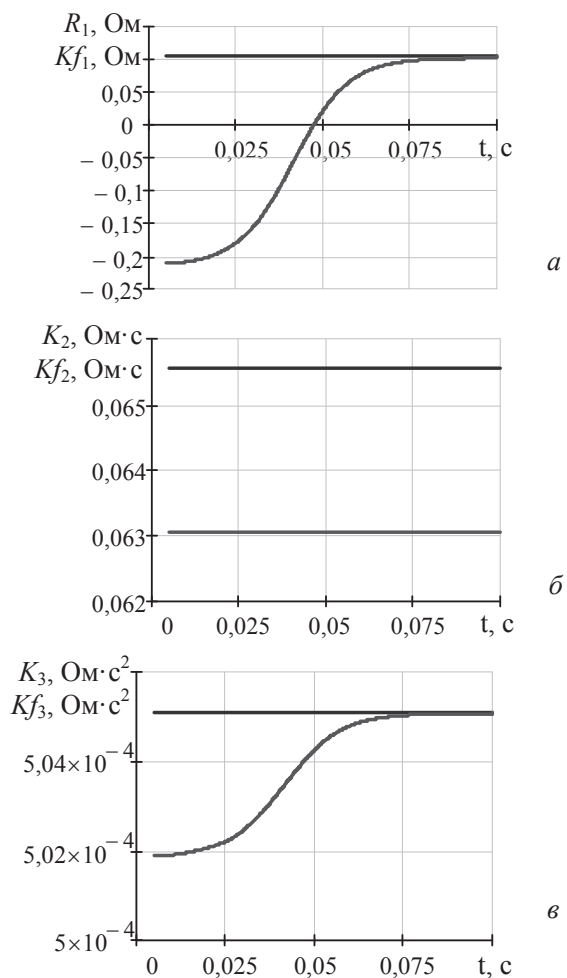


Рис. 2. Переходный процесс оценок коэффициентов а) $\hat{K}_1$, б) $\hat{K}_2$, в) $\hat{K}_3$ идентификационной модели асинхронного двигателя с неподвижным короткозамкнутым ротором

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – 448 с.
2. Glazyrin A.S., Bolovin E.V. Time delay adjustment for the method of parameter identification of dynamic object // Aktualne problemy nowjczesnych nauk-2012: Materiały VIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. – Пшемысль, 7–15 czerwca 2012. – Przemysł: Nauka i studia, 2012. – Т. 45. – С. 79–81.
3. Копченкова Н.В., Марон И.А. Вычислительная математика в примерах и задачах. – М.: Изд-во «Наука», 1972. – 367 с.
4. Кирьянов Д.В. Многоточечные аппроксимации производных // YouTube. 2011. URL: http://www.youtube.com/watch?v=oJ-EFFCfNeHU&list=PL1516D0C35386B45A&index=8&feature=plpp_video (дата обращения 05.10.2012).
5. Глазырин А.С., Боловин Е.В. Разработка и лабораторное опробование метода идентификации параметров электродвигателей на основе разностных схем // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 112–115

Поступила 15.10.2012 г.

УДК 621.313.333.2

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Р.Ю. Ткачук*, А.С. Глазырин

Томский политехнический университет
*ОАО «НПО «Карат», г. Санкт-Петербург
E-mail: Tkachuk.R.U@npo-karat.ru

Предложен метод построения отказоустойчивой системы управления асинхронным электроприводом. Рассмотрены способы адаптации системы управления к переходным процессам, возникающим в электроприводе при смене метода управления. Исследованы переходные процессы в разработанной системе электропривода посредством имитационного моделирования.

Ключевые слова:

Асинхронный электропривод, устойчивость к неисправности, отказоустойчивая система управления.

Key words:

Induction motor drive, fault tolerance, fault-tolerant control system.

Введение

В последнее время большое внимание привлекают отказоустойчивые системы управления (*fault-tolerant control* – *FTC*) электроприводами, способные выявлять зарождающиеся неисправности датчиков и исполнительных механизмов и оперативно адаптировать закон управления таким образом, чтобы сохранить заданные характеристики (качество производства, безопасность и т. д.). Для достижения этой цели система управления реорганизуется таким образом, чтобы использовать наилучший метод управления в соответствии с имеющимися сигналами обратных связей [1].

Одним из способов повышения надежности электропривода с помощью *FTC* является функциональное резервирование, при котором функция регулирования скорости асинхронного электродвигателя может выполняться с использованием замкнутой системы управления с датчиками, замкнутой бездатчиковой системы и разомкнутой системы.

Функциональная схема электропривода переменного тока с отказоустойчивой системой управления

Функциональная схема асинхронного электропривода с отказоустойчивой системой управления приведена на рис. 1. На рис. 1 приняты следующие

обозначения: ПЧ – преобразователь частоты; М – асинхронный электродвигатель; ДС – датчик скорости; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; И1, И2, И3 – системы идентификации; ПКП, ОКП – прямой и обратный координатные преобразователи.

Система управления реорганизуется таким образом, чтобы использовать наилучший метод управления в соответствии с имеющимися сигналами обратных связей. В случае отказа датчика скорости, он заменяется наблюдателем, который преобразует сигналы напряжения и тока статора в необходимую информацию о потокосцеплении и скорости двигателя. В случае отказа датчиков тока и датчика скорости, применяется разомкнутая система со скалярным управлением, чтобы гарантировать работоспособность электропривода.

Система *FTC* включает три модуля идентификации необходимых координат, и две системы управления – векторную и скалярную, переключение между которыми осуществляется в соответствии с табл. 1.

Таким образом, система *FTC* поддерживает электропривод в работоспособном состоянии при отказах датчиков тока и скорости. При таком подходе надежность системы электропривода значительно возрастает.