

УДК 621.34

С. М. ПЕРЕСАДА, А. Н. СЕРЕДА

## НОВЫЙ АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

### Введение

Реализация современных алгоритмов управления электромеханическими системами с асинхронными двигателями (АД) требует знания параметров электрических машин, поэтому определение параметров АД при инициализации системы является одной из важных стандартных функций современных асинхронных электроприводов. Обычно часть параметров рассчитывается на основании каталожных данных или может быть определена экспериментально с использованием специального оборудования. Однако, в большинстве случаев проведение специальных тестов невозможно в условиях реального внедрения, вследствие чего идентификация электрических параметров АД осуществляется на неработающем технологическом оборудовании, обычно на невращающемся двигателе или вращающемся со свободным валом.

АД описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений 5-го порядка, в которой неизвестными являются шесть параметров: сопротивления и индуктивности статора и ротора, взаимная индуктивность, приведенный к валу двигателя момент инерции. Момент нагрузки обычно также неизвестен. Вектор состояния системы доступен для измерения только частично: измеряются вектор тока статора и угловая скорость вращения ротора, в то время как вектор потокосцепления для измерения недоступен.

Проблема идентификации параметров и оценивания неизмеряемых координат нелинейных многомерных объектов с частично измеряемым вектором состояния до настоящего времени не имеет общего теоретического решения. АД с короткозамкнутым ротором относится к данному классу объектов управления,

поэтому большая часть предложенных технических решений основана на упрощённых подходах без строгого их теоретического обоснования. К таким решениям относится результат, приведенный в [1]. В этой же статье дан анализ основных подходов, используемых для определения параметров АД.

Лишь незначительное число аналитически обоснованных алгоритмов идентификации параметров АД представлено в литературе. В [2] авторы используют метод наименьших квадратов для идентификации электрических параметров, предполагая, что активное сопротивление статора известно. Для получения линейно-параметризованной модели оценивания дополнительно предполагается, что угловая скорость является постоянным параметром. В алгоритме идентификации используются первые производные от токов и напряжений статора, получение информации о которых на практике затруднительно. Аналогичный подход использован в [3], где для получения информации о производной тока используется наблюдатель, работающий в скользящем режиме. Идентифицируемыми параметрами являются активные сопротивления статора и ротора. В [2, 3] также даны выражения для вычисления значений вектора потокосцеплений ротора. Использование результатов [2, 3] в реальных системах предполагает решение труднопреодолимых проблем реального дифференцирования негладких сигналов.

Наблюдатель магнитного потока, адаптивный к вариациям активного сопротивления ротора впервые синтезирован в [4, 5]. Эти же авторы в [6] предложили алгоритм идентификации активных сопротивлений статора и ротора, не накладывающий ограничений на режимы работы АД. Он базируется на адаптивном наблюдателе девятого порядка, который при выполнении условий персистентности возбуждения гарантирует асимптотическое оценивание неизвестных параметров, а также неизмеряемого потокосцепления ротора. Результаты полномасштабных экспериментальных исследований адаптивных наблюдателей, приведенные в [4-6] (см. также [7, 8]), свидетельствуют об эффективности их применения в векторно-управляемом асинхронном электроприводе.

В [9] предложен алгоритм, основанный на специальной структуре параллельного адаптивного наблюдателя с расширенным вектором пространства состояния, который

позволяет оценивать все параметры АД. Алгоритм [9] также даёт информацию о потоке АД в процессе идентификации. Его недостатком является сложность структуры и отсутствие процедуры настройки параметров, что делает его неприменимым на практике. Аналогичная задача решена в [10] с использованием прямого адаптивного управления током АД при его однофазном возбуждении. Активное сопротивление статора считается известным (предварительно измеренным) и постоянным в процессе теста на невращающемся АД. Алгоритмы [9, 10] не могут быть применены для проведения тестов при вращающемся двигателе с управлением всеми фазами статора АД.

В данной статье впервые синтезирован алгоритм идентификации электрических параметров АД (при известном сопротивлении статора), который может быть использован как при однофазном возбуждении (неподвижном роторе), так и при полнофазном управлении АД со свободно вращающимся ротором. Адаптивный наблюдатель потокосцепления статора АД девятого порядка синтезирован с использованием теории адаптивных систем. Сходимость ошибок оценивания и идентификации гарантируется при выполнении условий персистентности возбуждения.

### 1 Математическая модель АД, постановка задачи идентификации

Стандартная двухфазная динамическая модель симметричного АД, записанная в стационарной системе координат статора ( $a$ - $b$ ), имеет вид [11]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega} &= \frac{1}{J} \left[ \frac{3}{2} n_p (\psi_a i_b - \psi_b i_a) - M_c \right] \\ \dot{\psi}_a &= -R_1 i_a + u_a \\ \dot{\psi}_b &= -R_1 i_b + u_b \\ i_a &= - \left( \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta + \alpha \right) i_a - \omega n_p i_b + \frac{\alpha}{\sigma} \psi_a + \frac{\omega}{\sigma} n_p \psi_b + \frac{1}{\sigma} u_a \\ i_b &= - \left( \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta + \alpha \right) i_b + \omega n_p i_a + \frac{\alpha}{\sigma} \psi_b - \frac{\omega}{\sigma} n_p \psi_a + \frac{1}{\sigma} u_b \end{aligned} \right\},$$

где  $i_a, i_b, u_a, u_b, \psi_a, \psi_b$  - токи, напряжения, потокосцепления статора по осям  $a$  и  $b$  соответственно;

$\omega$  - угловая скорость;

$M_c$  - момент нагрузки;

$n_p$  - число пар полюсов.

Положительные константы в (1), определяемые электрическими параметрами АД, равны:

$$\sigma = L_1 \left( 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \quad \alpha = \frac{R_2}{L_2}, \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}, \quad (2)$$

где  $R_1, R_2$  - активные сопротивления статора и ротора;

$L_1, L_2, L_m$  - индуктивности статора, ротора и взаимная индуктивность.

В соответствии с (1) АД описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений пятого порядка, в которой измеряемыми являются токи статора и угловая скорость ( $i_a, i_b, \omega$ ), потокосцепления статора ( $\psi_a, \psi_b$ ) неизмеряемы. В условиях эксплуатации момент нагрузки  $M_c$  обычно также неизвестен и неизмеряем. В общем случае в модели (1) неизвестными являются пять электрических параметров  $R_1, R_2, L_1, L_2, L_m$ , а также суммарный момент инерции механической части  $J$ . Для произвольного режима работы АД решение задачи идентификации шести неизвестных параметров при неизвестном моменте нагрузки, неизмеряемых компонентах вектора потокосцепления статора до настоящего момента времени не найдено. В то же время, если возможно проведение специального теста со свободным вращением АД (свободным валом), то идентификация электрических параметров модели АД возможна с использованием только её электрической части, которая описывается последними четырьмя уравнениями в (1), представляющими собой линейную нестационарную систему. При этом условия теста должны быть таковы, что угловая скорость  $\omega$  является ограниченной функцией с ограниченной первой производной.

Существенного упрощения также удаётся достичь, если использовать общепринятое допущение  $L_1=L_2$ , то есть полагать, что индуктивности рассеивания статора и ротора равны. Нетрудно также установить, что при  $u_a=const, u_b=0$ , для (1) справедливо выполнение условий:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i_a = \frac{u_a}{R_1}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} i_b = 0, \quad (3)$$

то есть активное сопротивление статора просто определяется по закону Ома при питании статора постоянным током.

Таким образом, если  $L_1=L_2$ , а  $R_1$

определено предварительно, то идентифицировать необходимо только три параметра, которые определены в (2). Из них непосредственно рассчитываются неизвестные параметры  $L_1=L_2, L_m, R_2$ .

Для целей идентификации в модели (1) определим следующие параметры:

$$b = d\alpha; \quad d = \frac{1}{\sigma}; \quad \gamma_0 = \alpha L_m \beta + \alpha. \quad (4)$$

С учётом (4), (1) уравнения электрической части АД запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_a &= -R_1 i_a + u_a \\ \dot{\psi}_b &= -R_1 i_b + u_b \\ i_a &= -\gamma_0 i_a - R_1 di_a - \omega n_p i_b + b\psi_a + d(\omega n_p \psi_b + u_a) \\ i_b &= -\gamma_0 i_b - R_1 di_b + \omega n_p i_a + b\psi_b + d(-\omega n_p \psi_a + u_b) \end{aligned} \right\} \cdot (5)$$

Пусть  $\hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b$  - оцененные значения тока и потокосцепления статора по осям  $a$  и  $b$ . Определим ошибки оценивания тока и потокосцепления статора, а также ошибки оценивания неизвестных параметров следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{i}_a &= i_a - \hat{i}_a, \quad \tilde{i}_b = i_b - \hat{i}_b, \\ \tilde{\psi}_a &= \psi_a - \hat{\psi}_a, \quad \tilde{\psi}_b = \psi_b - \hat{\psi}_b, \quad - \end{aligned} \quad (6)$$

$$\tilde{b} = b - \hat{b}, \quad \tilde{d} = d - \hat{d}, \quad \tilde{\gamma}_0 = \gamma_0 - \hat{\gamma}_0, \quad (7)$$

где  $\hat{b}, \hat{d}, \hat{\gamma}_0$  - оценки параметров  $b, d, \gamma_0$  соответственно.

Допустим, что ограниченные управляющие напряжения  $u_a, u_b$  сформированы таким образом, что вектор переменных состояния (1) является ограниченным. Неизвестные параметры АД  $b, d$  и  $\gamma_0$  в процессе идентификации могут рассматриваться как постоянные величины. В этих условиях требуется найти адаптивный алгоритм оценивания тока и потокосцепления статора, который гарантирует достижение следующих целей управления:

О.1. Асимптотическое оценивание тока, то есть:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_a, \tilde{i}_b) = 0. \quad (8)$$

О.2. Асимптотическое оценивание потокосцепления статора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}_a, \tilde{\psi}_b) = 0. \quad (9)$$

О.3. Асимптотическую идентификацию неизвестных параметров  $b, d, \gamma_0$



$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{b}, \tilde{d}, \tilde{\gamma}_0) = 0. \tag{10}$$

### 2 Синтез алгоритма идентификации

Анализ структурных свойств линейной нестационарной системы (5) с тремя неизвестными параметрами  $b, d$  и  $\gamma_0$  свидетельствует о том, что прямое использование существующих методов идентификации затруднительно вследствие присутствия в правой части (5) произведения неизвестных параметров и неизмеряемых переменных. Задача идентификации также усложняется тем, что из-за нелинейности и многомерности полной модели АД (1) класс управляющих воздействий  $u_a(t), u_b(t)$  в процессе тестирования ограничен только теми, которые гарантируют:

- а) устойчивость решений (1);
- б) нахождение вектора состояния (1) в области изменения, не противоречащей физике процесса электромеханического преобразования энергии.

Известно [12], что общетеоретического решения задачи замкнутого управления данным классом объектов при параметрической неопределённости не существует. В этой связи задача идентификации параметров рассмотрена не в классе адаптивного управления координатами АД, а сформулирована как задача адаптивного оценивания координат. При этом возможно использование разомкнутого управления АД с управляющими координатами  $u_a(t)$  и  $u_b(t)$ , приводящими к ограниченности решений системы (1).

Общая теория неадаптивных наблюдателей потокосцепления для электрической подсистемы АД, которая дана в [13], предполагает известность всех параметров (5). Используя общую форму неадаптивного наблюдателя Вергезе [13], сформируем адаптивный наблюдатель электрических координат АД в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{\psi}}_a &= -R_1 \hat{i}_a + u_a + k_1 \tilde{i}_a \\ \dot{\hat{\psi}}_b &= -R_1 \hat{i}_b + u_b + k_1 \tilde{i}_b \\ \dot{\hat{i}}_a &= -\hat{\gamma}_0 \hat{i}_a - \omega n_p \hat{i}_b + \hat{b} \hat{\psi}_a + \hat{d} (-R_1 \hat{i}_a + \omega n_p \hat{\psi}_b + u_a) + k_1 \tilde{i}_a - v_a \\ \dot{\hat{i}}_b &= -\hat{\gamma}_0 \hat{i}_b + \omega n_p \hat{i}_a + \hat{b} \hat{\psi}_b + \hat{d} (-R_1 \hat{i}_b - \omega n_p \hat{\psi}_a + u_b) + k_1 \tilde{i}_b - v_b \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

где  $v_a$  и  $v_b$  – дополнительные корректирующие сигналы, которые будут определены далее.

Отметим, что при формировании уравнений (11) использован подход, впервые предложенный в [4] для синтеза наблюдателя, адаптивного только к неизвестному сопротивлению ротора.

Из (5) и (11), а также с учётом определений (6) и (7), уравнения динамики ошибок оценивания запишутся:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\tilde{\psi}}_a &= -(R_1 + k_1) \tilde{i}_a \\ \dot{\tilde{\psi}}_b &= -(R_1 + k_1) \tilde{i}_b \\ \dot{\tilde{i}}_a &= -(\gamma_0 + R_1 d + k_i) \tilde{i}_a - \omega n_p \tilde{i}_b + b \tilde{\psi}_a - \tilde{\gamma}_0 \hat{i}_a + \tilde{b} \hat{\psi}_a + \tilde{d} (-R_1 \hat{i}_a + \omega n_p \hat{\psi}_b + u_a) + d \omega n_p \tilde{\psi}_b + v_a \\ \dot{\tilde{i}}_b &= -(\gamma_0 + R_1 d + k_i) \tilde{i}_b + \omega n_p \tilde{i}_a + b \tilde{\psi}_b - \tilde{\gamma}_0 \hat{i}_b + \tilde{b} \hat{\psi}_b + \tilde{d} (-R_1 \hat{i}_b - \omega n_p \hat{\psi}_a + u_b) - d \omega n_p \tilde{\psi}_a + v_b \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

Синтез алгоритма идентификации для нелинейной системы (12) затруднителен из-за присутствия в правой части компонент  $d \omega n_p \tilde{\psi}_b$  и  $d \omega n_p \tilde{\psi}_a$ , пропорциональных неизвестному параметру и неизмеряемым координатам. Поэтому следующим шагом синтеза является их адаптивная компенсация. Для этого используются дополнительные корректирующие сигналы  $v_a$  и  $v_b$ , сформированные следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} v_a &= -\hat{d} \omega n_p \hat{\psi}_b, \\ v_b &= \hat{d} \omega n_p \hat{\psi}_a, \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

где  $\hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b$  - оценки  $\tilde{\psi}_a, \tilde{\psi}_b$ .

Определив ошибки оценивания изменяющихся во времени переменных  $\tilde{\psi}_a(t)$  и  $\tilde{\psi}_b(t)$

$$\begin{aligned}\tilde{\psi}_a &= \tilde{\psi}_a - \hat{\psi}_a, \\ \tilde{\psi}_b &= \tilde{\psi}_b - \hat{\psi}_b,\end{aligned}\quad (14)$$

перепишем (12) с учётом (13) в виде:

$$\left. \begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_a &= -(R_1 + k_1)\tilde{i}_a \\ \dot{\tilde{\psi}}_b &= -(R_1 + k_1)\tilde{i}_b \\ \dot{\tilde{i}}_a &= -(\gamma_0 + R_1 d + k_i)\tilde{i}_a - \omega n_p \tilde{i}_b + b\tilde{\psi}_a + \tilde{b}\hat{\psi}_a + \tilde{d}(-R_1 \hat{i}_a + \omega n_p \hat{\psi}_b + \omega n_p \hat{\psi}_a + u_a) - \tilde{\gamma}_0 \hat{i}_a + d\omega n_p \tilde{\psi}_b \\ \dot{\tilde{i}}_b &= -(\gamma_0 + R_1 d + k_i)\tilde{i}_b + \omega n_p \tilde{i}_a + b\tilde{\psi}_b + \tilde{b}\hat{\psi}_b + \tilde{d}(-R_1 \hat{i}_b - \omega n_p \hat{\psi}_a - \omega n_p \hat{\psi}_b + u_b) - \tilde{\gamma}_0 \hat{i}_b - d\omega n_p \tilde{\psi}_a\end{aligned}\right\} (15)$$

Правая часть нелинейных дифференциальных уравнений (15) является функцией семи неизвестных переменных  $(\tilde{\psi}_a, \tilde{\psi}_b, \tilde{b}, \tilde{d}, \tilde{\gamma}_0, \tilde{\psi}_a, \tilde{\psi}_b)$ . Динамическое поведение  $\tilde{\psi}_a(t), \tilde{\psi}_b(t)$  определено первыми двумя уравнениями в (15), в то время как динамика остальных должна быть определена для достижения целей управления О.1-О.3.

Для синтеза алгоритма идентификации рассмотрим неотрицательную функцию (кандидатуру функции Ляпунова)

$$V = \frac{1}{2} \left[ \tilde{i}_a^2 + \tilde{i}_b^2 + \frac{b}{R_1 + k_1} (\tilde{\psi}_a^2 + \tilde{\psi}_b^2) + \gamma_1^{-1} \tilde{b}^2 + \gamma_2^{-1} \tilde{d}^2 + \gamma_3^{-1} \tilde{\gamma}_0^2 + d\gamma_4^{-1} (\tilde{\psi}_a^2 + \tilde{\psi}_b^2) \right], \quad (16)$$

производная которой в силу (15) равна:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -(\gamma_0 + R_1 d + k_i)(\tilde{i}_a^2 + \tilde{i}_b^2) + \gamma_1^{-1} \tilde{b}\dot{\tilde{b}} + \tilde{b}(\hat{\psi}_a \dot{\tilde{i}}_a + \hat{\psi}_b \dot{\tilde{i}}_b) + \gamma_2^{-1} \tilde{d}\dot{\tilde{d}} + \tilde{d}\dot{\tilde{i}}_a f_a + \tilde{d}\dot{\tilde{i}}_b f_b + \\ &+ \gamma_3^{-1} \tilde{\gamma}_0 \dot{\tilde{\gamma}}_0 - \tilde{\gamma}_0 (\dot{\tilde{i}}_a \hat{i}_a + \dot{\tilde{i}}_b \hat{i}_b) + d\gamma_4^{-1} (\tilde{\psi}_a \dot{\tilde{\psi}}_a + \tilde{\psi}_b \dot{\tilde{\psi}}_b) + d\omega n_p \tilde{\psi}_b \dot{\tilde{i}}_a - d\omega n_p \tilde{\psi}_a \dot{\tilde{i}}_b,\end{aligned}\quad (17)$$

где  $f_a = -R_1 \hat{i}_a + \omega n_p \hat{\psi}_b + \omega n_p \hat{\psi}_a + u_a$ ,  $f_b = -R_1 \hat{i}_b - \omega n_p \hat{\psi}_a - \omega n_p \hat{\psi}_b + u_b$ .

Определив в (17) динамику ошибок оценивания параметров и вспомогательных переменных следующим образом

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{b}} &= \dot{\tilde{b}} - \hat{\dot{\tilde{b}}} = -\gamma_1 (\hat{\psi}_a \tilde{i}_a + \hat{\psi}_b \tilde{i}_b), \\ \dot{\tilde{d}} &= \dot{\tilde{d}} - \hat{\dot{\tilde{d}}} = -\gamma_2 (f_a \tilde{i}_a + f_b \tilde{i}_b), \\ \dot{\tilde{\gamma}}_0 &= \dot{\tilde{\gamma}}_0 - \hat{\dot{\tilde{\gamma}}_0} = \gamma_3 (\tilde{i}_a \hat{i}_a + \tilde{i}_b \hat{i}_b),\end{aligned}\quad (18)$$

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_a &= \gamma_4 \omega n_p \tilde{i}_b, \\ \dot{\tilde{\psi}}_b &= -\gamma_4 \omega n_p \tilde{i}_a,\end{aligned}\quad (19)$$

получим

$$\dot{V} = -(\gamma_0 + k_i)(\tilde{i}_a^2 + \tilde{i}_b^2) \leq 0. \quad (20)$$

Из (16) и (20) устанавливаем, что  $V$  является функцией Ляпунова, а, следовательно, переменные, входящие в выражения для  $V$ , являются ограниченными. Полные уравнения динамики ошибок оценивания (15) и идентификации (18), (19) могут быть записаны в следующей стандартной форме:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{i}}} &= \mathbf{A}(t)\tilde{\mathbf{i}} + \mathbf{W}(t)\mathbf{D}^{-1}\mathbf{x}, \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}} &= -\mathbf{\Gamma} \mathbf{W}^T(t)\tilde{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{i}},\end{aligned}\quad (21)$$

перетворення, що становить всього 30 кВт технологічний напіг. Високи енергетичні частоти ПЧ та БКП, рівному 70%. Таким чином, точного керування планшетністю, а також зберігається (незначних змін обладнання),

$$\hat{\mathbf{i}} = (\tilde{i}_a, \tilde{i}_b)^T, \mathbf{x} = (\tilde{\psi}_a, \tilde{\psi}_b, \tilde{b}, \tilde{d}, \tilde{\gamma}_0, \tilde{\psi}_a, \tilde{\psi}_b)^T, \mathbf{\Gamma} = \text{diag} [(R_1 + k_1), (R_1 + k_1), \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_4] > 0,$$

$$\mathbf{A}(t) = \begin{pmatrix} -(\gamma_0 + R_1 d + k_1) & -\omega n_p \\ \omega n_p & -(\gamma_0 + R_1 d + k_1) \end{pmatrix}, \mathbf{D} = \text{diag} \left( \frac{1}{b}, \frac{1}{b}, 1, 1, 1, \frac{1}{d}, \frac{1}{d} \right) > 0, \mathbf{P} = \text{diag} [1, 1];$$

Запропонована енергозберігаюча електроніка даної системи керування планшетністю на основі безконтактних електромагнітних (ТЕД) дозволяють рекомендувати впровадження регулювання розподілу напігу штаби по лінійній ширині (матрица регрессии).

$$\mathbf{W}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \hat{\psi}_a & f_a & -\hat{i}_a & 0 & \omega n_p \\ 0 & 1 & \hat{\psi}_b & f_b & -\hat{i}_b & -\omega n_p & 0 \end{bmatrix}$$

Форма записи уравнений (21) следует из представления функции Ляпунова (16) в виде  $V = \frac{1}{2}(\hat{\mathbf{i}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{i}} + \mathbf{x}^T \mathbf{\Gamma}^{-1} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{x})$ , которая впервые предложена в [14] для синтеза адаптивного управления синхронным двигателем.

Ранее установлено, что переменные, заданные векторами  $\hat{\mathbf{i}}$  и  $\mathbf{x}$ , являются ограниченными, поэтому при ограниченных  $(u_a, u_b), (i_a, i_b), (\psi_a, \psi_b), \omega$  переменные  $\hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b, \hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b$  также ограничены, то есть  $\mathbf{W}(t)$  в (21) ограничена, а, следовательно,  $\hat{\mathbf{i}}$  ограничен. Из (20) устанавливаем выполнение условия

$$\int_0^t [\tilde{i}_a^2(\tau) + \tilde{i}_b^2(\tau)] d\tau = -\frac{1}{\gamma_0 + R_1 d + k_1} [V(t) - V(0)] \leq \frac{V(0)}{\gamma_0 + R_1 d + k_1},$$

которое гарантирует, что  $\tilde{i}_a(t)$  и  $\tilde{i}_b(t)$  являются квадратично интегрируемыми. Дополнительно они являются ограниченными с ограниченной производной, поэтому, в соответствии с леммой Барбалат [15, стр. 86], заключаем, что

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_a, \tilde{i}_b) = 0.$$

Если в процессе теста идентификации условия персистентности возбуждения выполняются, то есть матрица размером  $[7 \times 7]$

$$\int_1^{1+T} \mathbf{W}(\tau)^T \mathbf{W}(\tau) d\tau > 0$$

для некоторого  $T > 0$  и всех  $t \geq 0$ , то поскольку  $\dot{\mathbf{W}}(t)$  ограничена, положение равновесия системы  $(\hat{\mathbf{i}}, \mathbf{x}) = 0$  является глобально экспоненциально устойчивым [15, стр. 72-75]. Таким образом, при выполнении условий персистентности возбуждения, цели управления О1-О3 достигаются глобально.

Исходя из предположения о постоянстве идентифицируемых параметров ( $\dot{b} = 0, \dot{d} = 0, \dot{\gamma}_0 = 0$ ), уравнения динамики оцениваемых параметров и вспомогательных переменных запишутся в явной форме:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{b}} &= \gamma_1 (\hat{\psi}_a \tilde{i}_a + \hat{\psi}_b \tilde{i}_b) \\ \dot{\hat{d}} &= \gamma_2 (f_a \tilde{i}_a + f_b \tilde{i}_b) \\ \dot{\hat{\gamma}}_0 &= -\gamma_3 (\tilde{i}_a \hat{i}_a + \tilde{i}_b \hat{i}_b) \end{aligned} \tag{23}$$

Стан проблеми та постановка задачі (ТЕД) можна використовувати опосередковано шляхом застосування осів (ТН) або безпосередньо, коли споживаючі в системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ТВД) мають доступ до джерел енергії в Україні [1, 2]. В [1] зовсім не згадується ТЕД, а в [2] (24) наш

Полные уравнения адаптивного наблюдателя задаются (11), (13), (23), (24). Из оцененных значений  $\hat{b}, \hat{d}, \hat{\gamma}_0$  (при заранее определенном  $R_1$ ) физические параметры АД  $L=L_1=L_2, L_m$  и



$R_2$  рассчитываются с помощью следующих выражений (см. (2) и (4)):

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{\hat{d}}, \hat{\alpha} = \hat{b}\hat{\sigma}, \hat{L} = \frac{\hat{\gamma}_0\hat{\sigma}}{\hat{\alpha}}, \hat{L}_m = \sqrt{\hat{L}(\hat{L} - \hat{\sigma})}, \hat{R}_2 = \hat{\alpha}\hat{L}. \quad (25)$$

Аналитическая процедура синтеза адаптивного наблюдателя в соответствии с (11)-(24) позволяет преодолеть структурные свойства модели (5), которые препятствуют применению стандартных методов теории адаптивных систем. С общетеоретических позиций это достигается за счёт введения избыточных динамических переменных (13), которые хоть и увеличивают размерность наблюдателя, однако гарантируют наблюдателю свойство глобальной экспоненциальной устойчивости. Это свойство, определяющее наиболее сильную форму устойчивости нелинейных систем, является принципиальным, поскольку гарантирует решению грубость в отношении неидентифицируемых параметров, а также немоделируемой динамики. Применительно к рассмотренной задаче к таким немоделируемым эффектам относятся насыщение магнитной системы АД, а также изменение активных сопротивлений статора и ротора при нагреве машины за интервал времени тестирования.

### 3 Исследование динамики наблюдателя

Разработанный адаптивный наблюдатель исследован методом математического моделирования для двух двигателей, параметры которых приведены в таблице 1.

Таблица 1  
Параметры тестируемых двигателей

Наименование параметра	Параметры 1-го двигателя	Параметры 2-го двигателя
Физические параметры		
Мощность, кВт	0,75	2,2
Номинальный ток, А	2	5,5
Номинальный поток, Вб	0,95	0,95
Физические параметры		
$R_1$ , Ом	11	3,2
$R_2$ , Ом	5,5	2,5
$L_1 = L_2$ , Гн	0,95	0,28
$L_m$ , Гн	0,91	0,2709
$J$ , кг м <sup>2</sup>	0,0036	0,015
Расчётные параметры		
$\sigma$	0,0783	0,0179
$\alpha$	5,789	8,9286
$\beta$	12,23	54,037
Идентифицируемые параметры		
$b = d\alpha$	73,925	498,68
$d = 1/\sigma$	12,7688	55,853
$\gamma_0 = \alpha + \alpha L_m \beta$	70,23	139,63

При моделировании начальные значения идентифицируемых параметров и оцениваемых переменных были приняты равными нулю. Коэффициенты усиления адаптивного наблюдателя выбраны следующими:  $k_i=100$ ,  $k_j=1$ ,  $\gamma_1=5000$ ,  $\gamma_2=10$ ,  $\gamma_3=600$ ,  $\gamma_4=0,1$ .

На рисунках 1-3 представлены графики поведения переменных АД в процессе теста идентификации. Первые две секунды двигатель остается неподвижным. При этом к фазе (a) двухфазной схемы замещения АД прикладывается модулированное напряжение, тогда как напряжение фазы (b) равняется нулю. Начиная с момента времени  $t=2$  осуществляется полнофазное управление тестируемых АД.

Из графиков переходных процессов следует асимптотичность оценивания координат АД, а также сходимость в нуль ошибок идентификации параметров. Для каждого из тестируемых АД

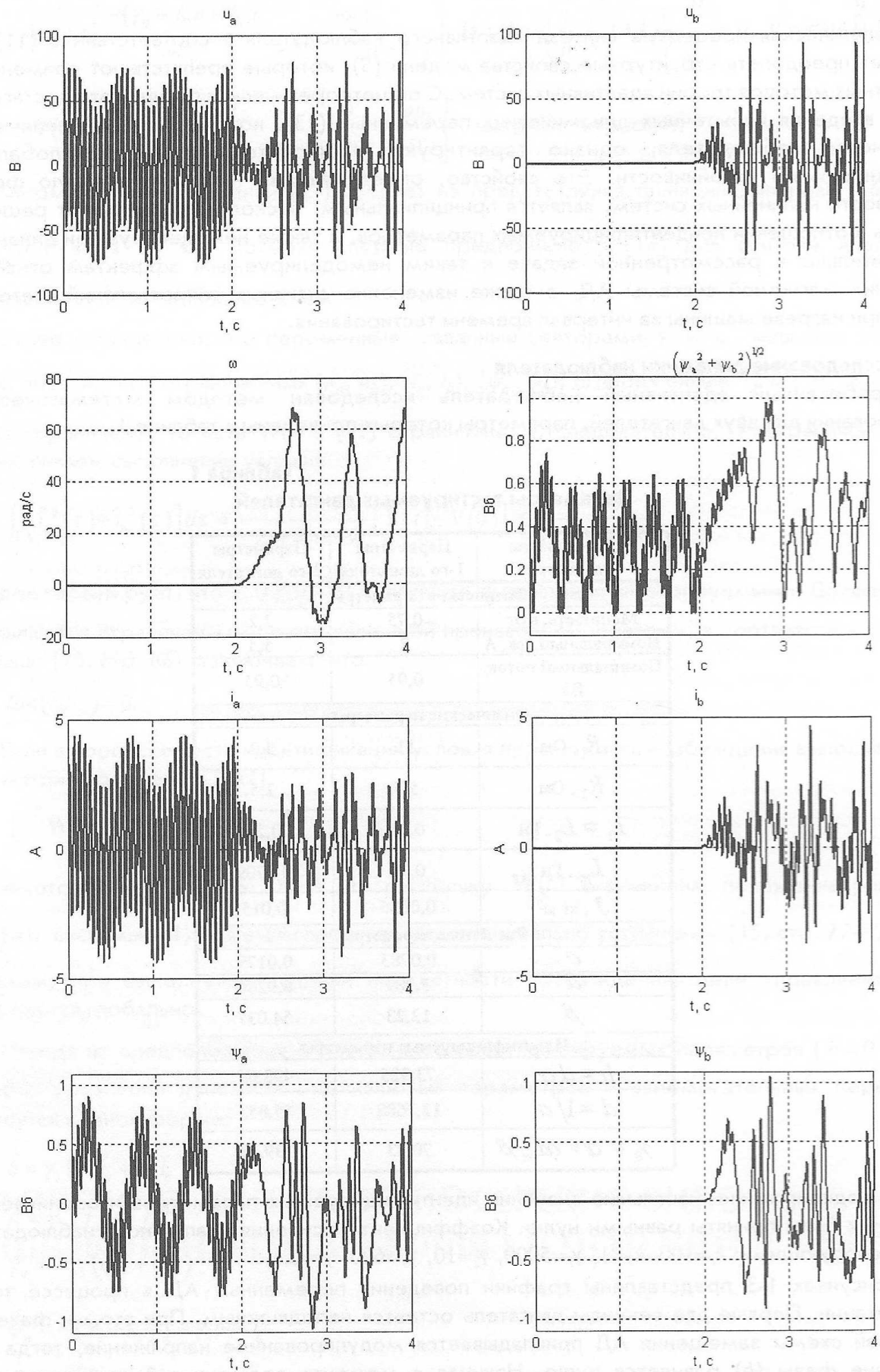


Рис. 1. Умовля моделювання процесу тестування АД потужністю 0,75 кВт



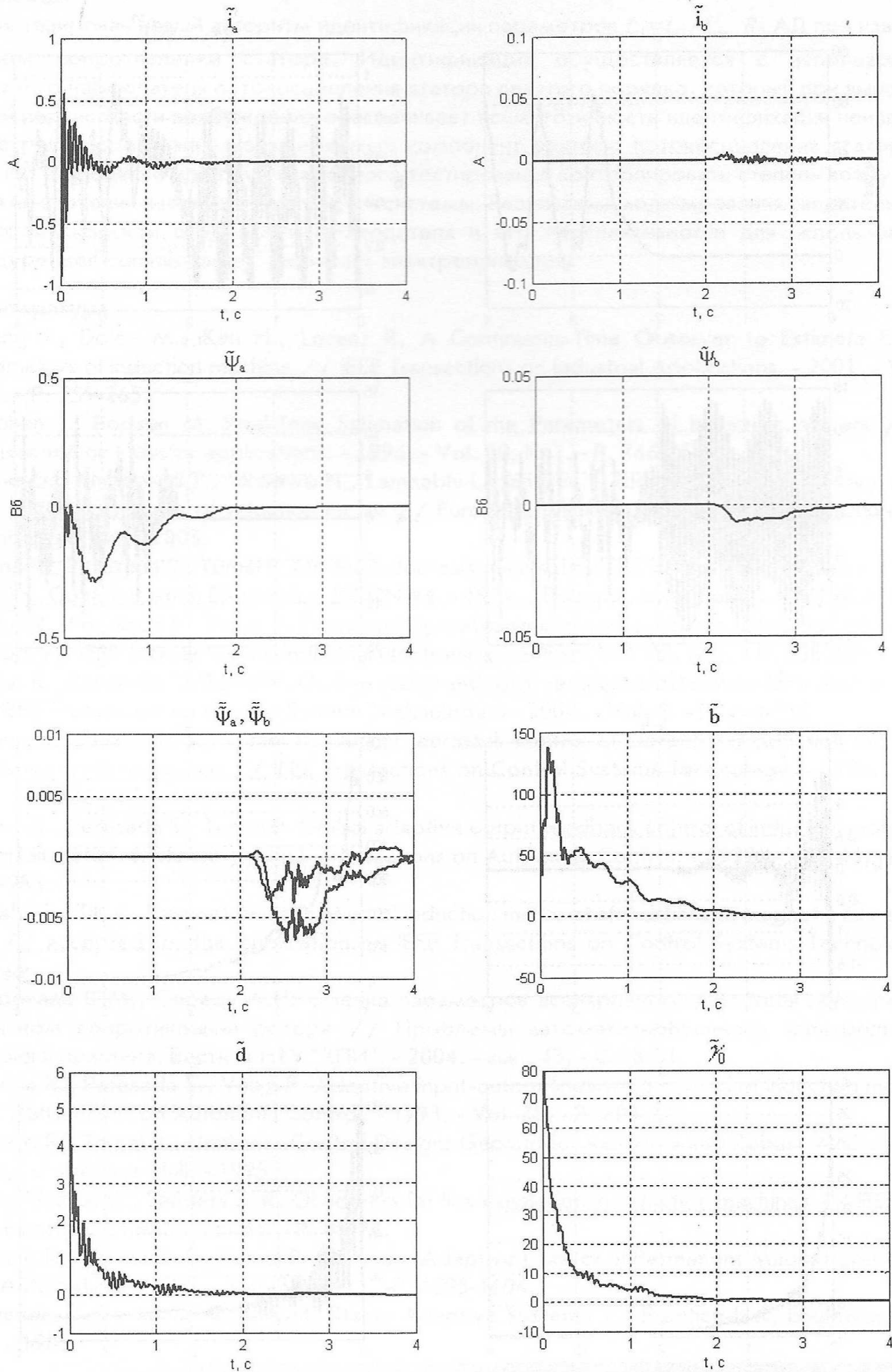


Рис. 2. Динамічне поведіння помилок оцінювання і ідентифікації при тестуванні АД потужністю 0,75 кВт

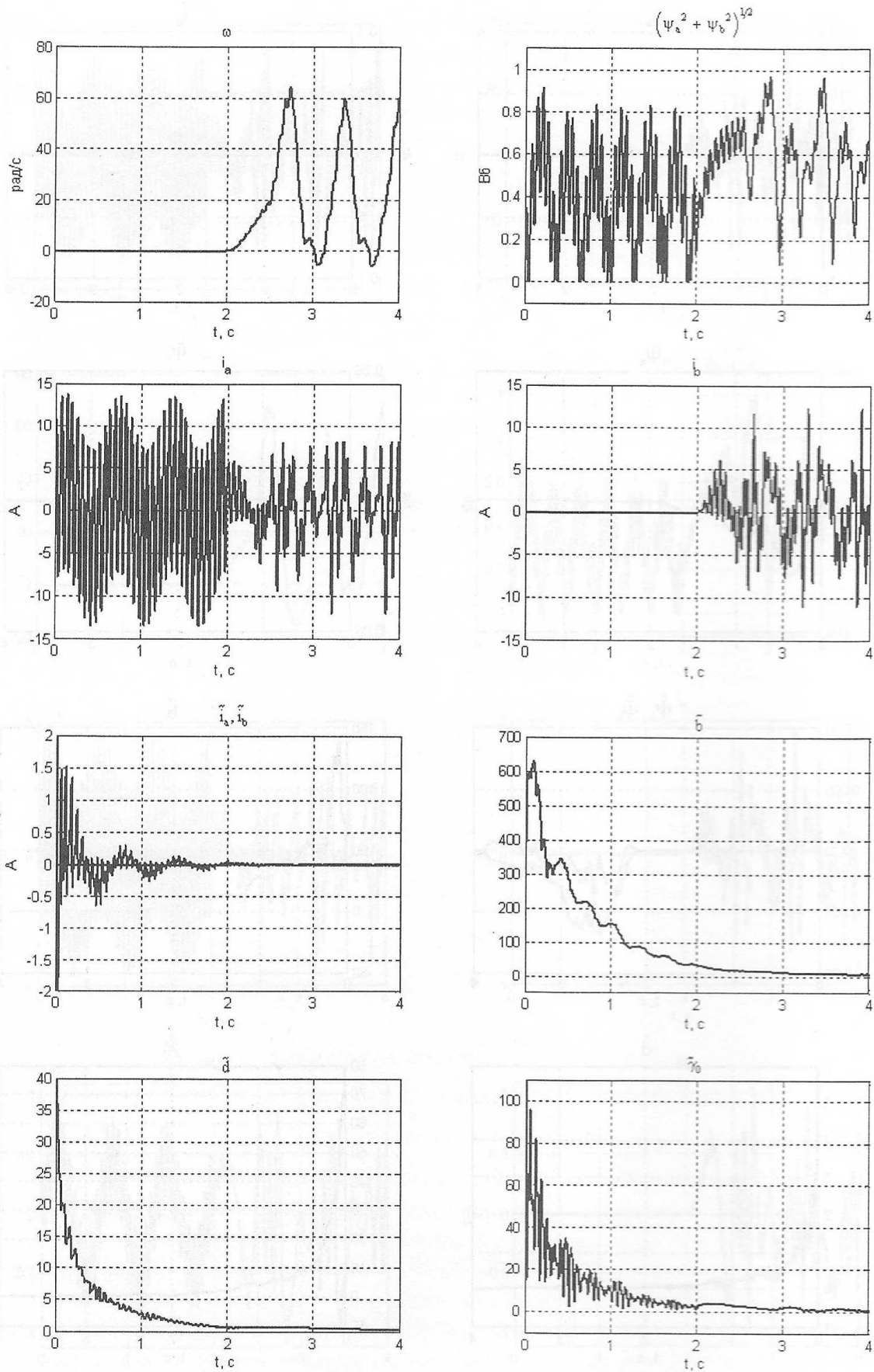


Рис. 3. Переходные процессы при тестировании АД мощностью 2,2 кВт

процесс идентификации завершается в пределах  $3s$ , что позволяет рассматривать активные сопротивления и постоянными на этом интервале.

### Выводы

Синтезирован новый алгоритм идентификации параметров  $L_1=L_2$ ,  $L_m$ ,  $R_2$  АД при известном активном сопротивлении статора. Идентификация осуществляется с использованием адаптивного наблюдателя потокосцепления статора девятого порядка, который при выполнении условий персистентности возбуждения обеспечивает асимптотичность идентификации неизвестных параметров и оценивания неизмеряемых компонент вектора потокосцепления статора, что позволяет в процессе идентификационного тестирования контролировать степень возбуждения АД для исключения насыщения магнитной системы. Результаты моделирования свидетельствуют о высокой скорости сходимости наблюдателя и его перспективности для использования в процедуре "self-commissioning" серийных электроприводов.

### Литература

1. Chung J., Dolen M., Kim H., Lorenz R. A Continuous-Time Observer to Estimate Electrical Parameters of Induction machine // IEEE Transactions on Industrial Applications. - 2001. - Vol. 30, №3. - P. 259-265.
2. Stephan J., Bodson M. Real-Time Estimation of the Parameters of Induction Motors // IEEE Transaction on Industry applications. - 1994. - Vol. 30, №3. - P. 746-759.
3. Kenne G., Ahmed-Ali T., Nkwawo H., Lamnabhi-Lagarrigue F. Identification of time-varying rotor and stator resistances of induction motor // European Control Conference-ECC03, University of Cambridge, UK. - 2003.
4. Marino R., Peresada S., Tomei P. On-line rotor resistance estimation for induction motors // in Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Electronics. IECON-94. - 1994. - Bologna, Italy, Sept. - P. 2137-2141.
5. Marino R., Peresada S., Tomei P. Exponentially convergent rotor resistance estimation for induction motors // IEEE Transaction on Industrial Electronics. - 1995. - Vol. 42, №5. - P. 508-515.
6. Marino R., Peresada S., Tomei P. On-line stator and rotor resistance estimation for induction motors // IEEE Transaction on Control System Technology - 2000. - Vol. 8. - P. 248-253.
7. Marino R., Peresada S., Tomei P. Output feedback control of current-fed induction motor with unknown rotor resistance // IEEE Transactions on Control Systems Technology. - 1996. -Vol. 4, №4. - P. 336-348.
8. Marino R., Peresada S., Tomei P. Global adaptive output feedback control of induction motors with uncertain rotor resistance // IEEE Transactions on Automatic Control. - 1999. - Vol. 44, №5. - P. 967-983.
9. Castaldi P., Tilli A. Parameters estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring // accepted for the publication on IEEE Transactions on Control Systems Technology: to appear.
10. Пересада С.М., Серета А.Н. Оценка параметров асинхронного двигателя при известном активном сопротивлении ротора // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Вестник НТУ "ХПИ". - 2004. - вып. 43. - С.28-31.
11. Marino R., Peresada S., Valigi P. Adaptive input-output linearizing control of induction motor // IEEE Transactions on Automatic Control. - 1993. - Vol. 38. - P. 208-221.
12. Marino R., Tomei P.. Nonlinear Control Design: Geometric, Adaptive and Robust // Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. - 1995.
13. Verghese G. C., Sanders S. R. Observers for flux estimation in induction machines // IEEE Trans. Ind. Electron. - 1988. - Vol.35. - P. 85-94.
14. Marino R., Peresada S., Tomei P. Nonlinear Adaptive Control of Permanent Magnet Step Motors // Automatica. - 1995. - Vol. 31, №11. -P. 1595-1604.
15. Narendra K.S., Annaswamy A.M. Stable Adaptive Systems // Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. - 1989.