УДК 519.7:626.54

А.В. РУДАКОВА, О.В. ПОЛИВОДА, А.А. ОМЕЛЬЧУК
Херсонский национальный технический университет

ПРОЦЕДУРА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО ОБЪЕКТА

Рассмотрены особенности построения модели процесса перемещения крупногабаритного объекта на примере спуска судна на слипе. Проведен анализ эффективности применения разных методов идентификации (стохастической аппроксимации и наименьших квадратов) параметров линеаризованной модели в пространстве состояний. Исследованы проблемы настройки алгоритмов, связанные с выбором начальных расчетных значений и весовых коэффициентов, которые влияют как на их сходимость, так и на величину ошибки.

Ключевые слова: идентификация, стохастическая аппроксимация, метод наименьших квадратов, сходимость, ошибка.

Г.В. РУДАКОВА, О.В. ПОЛИВОДА, А.А. ОМЕЛЬЧУК
Херсонський національний технічний університет

ПРОЦЕДУРА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНОГО ОБ’ЄКТУ

Розглянуто особливості побудови моделі процесу переміщення великогабаритного об'єкта на прикладі спуску судна на сліпі. Проведено аналіз ефективності застосування різних методів ідентифікації (стохастичної апроксимації і найменших квадратів) параметрів лінеаризованої моделі в просторі станів. Досліджено проблеми настройки алгоритмів, пов'язані з вибором початкових розрахункових значень і вагових коефіцієнтів, які впливають як на їх збіжність, так і на величину помилки.

Ключові слова: ідентифікація, стохастична апроксимація, метод найменших квадратів, збіжність, похибка.

G.V. RUDAKODA, O.V. POLYVODA, A.A. OMELCHUK
Kherson National Technical University

IDENTIFICATION PROCEDURE OF MODEL PARAMETERS OF LARGE OBJECTS MOVEMENT

The features of the model building process of moving large object on the example of vessel descent on the slip are considered. The analysis of the effectiveness of different identification methods (stochastic approximation and least squares) of the linearized model parameters in the state space is performed. The problems of algorithms settings associated with the choice of the initial and calculated values of weighting coefficients, which affect both their convergence and the magnitude of the error, are researched.

Keywords: identification, stochastic approximation, least squares method, convergence, error.

Постановка проблемы

Перемещение крупногабаритных объектов осуществляется посредством взаимосвязанной работы комплекса электрических приводов и механизмов. Процессы перемещения происходят в нестационарных условиях при воздействии внешних факторов, которые существенно изменяются на протяжении всего пути, что зачастую приводит к возникновению нештатных ситуаций. Надежное функционирование таких комплексов возможно только при согласованном управлении компонентами системы. При оперативном управлении работой электромеханических комплексов периодически возникают задачи идентификации параметров модели процесса перемещения [1].

Анализ последних исследований и публикаций

Согласно современной теории управления синтез оптимальных управляющих воздействий основывается на линеаризованной модели системы, представленной в пространстве состояний [2]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}. \end{cases} \quad (1)$$

Моделирование особенностей перемещения крупногабаритного объекта рассмотрим на примере процесса спуска судна на слипе. Силы, действующие на распределенный, движущийся по направлению оси x объект «судно-тележки», показаны на рис. 1. Во время процесса перемещения происходит два вида движения: поступательное со скоростью v и ускорением a, и вращательное с угловой скоростью ω и углом поворота φ.

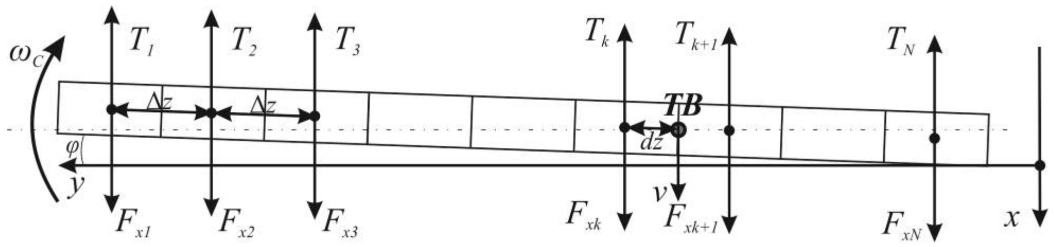


Рис. 1. Действие сил на объект «судно-тележки»

На основе анализа уравнений движения сформулированы уравнения состояния модели объекта «судно-тележки» в пространстве состояний в виде

$$\dot{x}_1 = x_2\,,\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{N} F_{xi}(x_1) - \frac{T_m}{m}\sum_{i=1}^{N} u_i\,,$$

$$\dot{x}_3 = x_4\,,\ \dot{x}_4 = \frac{1}{J}\sum_{i=1}^{N}\left(T_m u_i - F_{xi}(x_1)\right)\cdot\left[(k-i)\Delta z + dz\right]\cdot\cos x_3\,, \qquad (2)$$

где $x_1 = l$ – перемещение центра масс судна вдоль оси x; $x_2 = v$ – скорость поступательного движения центра масс вдоль оси x; $x_3 = \varphi$ – угол поворота судна; $x_4 = \omega$ – скорость вращения судна; $\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 & u_2 & \ldots & u_N \end{pmatrix}^T$ – вектор управления, $u_i = T_i / T_m$, $i = \overline{1,N}$; T_i – сила натяжения троса i-й тележки; T_m – предельно допустимое натяжение троса; $F_{xi}(l_i)$ – величина нагрузки на i-й привод, обусловленная силами, влияющими на тележку в точке траектории движения l_i; $m = m_c + N \cdot m_{\text{т}}$ – масса объекта «судно-тележка», m_c – масса судна, N – количество тележек, $m_{\text{т}}$ – масса тележки; J – момент инерции судна; Δz – расстояние между центрами соседних тележек; dz – расстояние от точки вращения (ТВ) (центра масс объекта) к центру k-й тележки.

Уравнения выхода модели имеют вид

$$y_j = x_1 - \left[(k-j)\Delta z + dz\right]\sin x_3\,,\ j = \overline{1,r}\,, \qquad 3)$$

где r – количество выходов, необходимых для идентификации параметров движения сложного объекта.

Разработанная в пространстве состояний модель перемещения судна на слипе, которая учитывает все существенные внешние факторы, является нелинейной, 4-го порядка [3].

В результате линеаризации была получена математическая модель в пространстве состояний в векторно-матричной форме

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}\,,\quad \vec{y} = \mathbf{C}(k)\cdot\vec{x}, \qquad (4)$$

где матрицы $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ и $\mathbf{C}$, имеют постоянную структуру, но изменяются в зависимости от условий функционирования системы и имеют вид

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & 0 \end{pmatrix},\ \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ K_1 & K_1 & \cdots & K_1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ q_1 K_2 & q_2 K_2 & \cdots & q_N K_2 \end{pmatrix},\ \mathbf{C}(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & q_1 & 0 \\ 1 & 0 & q_N & 0 \end{pmatrix}. \qquad (5)$$

Элементы матрицы $\mathbf{A}$ определяются как $a_{21} = f_{21}(x_{1s}, x_{3s})$, $a_{23} = f_{23}(x_{1s})$, $a_{41} = f_{41}(x_{1s}, x_{3s})$, $a_{43} = f_{43}(x_{1s})$, где x_{1s}, x_{3s} – элементы вектора стабильного состояния объекта

$\mathbf{x}_s = (x_{1s}, \ldots, x_{4s})^T$; $K_1 = -T_m / m$, $K_2 = T_m / J$ – масштабные коэффициенты; $q_i = (k - i)\Delta z + dz$, $i = \overline{1, N}$ – удаленность центра i-й тележки от точки вращения; элементы матрицы $\mathbf{C}$ соответствуют структуре системы измерения.

Для поиска неопределенных значений компонент матрицы $\mathbf{A}$, соответствующих конкретным условиям перемещения, необходимо использовать процедуру идентификации. Для осуществления процедуры идентификации разработано много методов: градиентный, стохастической аппроксимации, метод наименьших квадратов, корреляционный, частотный и др., однако не все они пригодны для использования при управлении в реальном времени [4].

Формулирование цели исследования

Целью исследований является сравнительный анализ эффективности применения различных методов идентификации для определения параметров линеаризованной модели процесса перемещения крупногабаритного объекта.

Изложение основного материала исследования

Рассмотрим процедуры идентификации с использованием методов рекуррентной стохастической аппроксимации и наименьших квадратов для определения параметров модели процесса перемещения судна на слипе, представленной в виде (5).

1. Метод стохастической аппроксимации.

Для реализации метода стохастической аппроксимации задаются начальные значения компонент вектора состояний объекта и модели $\mathbf{x}_o[0] = \mathbf{x}_m[0]$, а также матрицы $\mathbf{A}[0]$. При известной динамике управления и вектора состояний объекта $\mathbf{u}[k]$, $\mathbf{x}_o[k]$ для $k = 1, 2, 3, \ldots N$ определяют значения компонент вектора состояния модели $\mathbf{x}_m[k]$, вектор отклонения состояний объекта и модели $\mathbf{e}[k]$, и матрицу $\mathbf{\Gamma}[k]$ с помощью соотношений [5]:

$$\mathbf{x}_m[k] = \mathbf{A}[k-1] \cdot \mathbf{x}_m[k-1] + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}[k-1], \tag{6}$$

$$\mathbf{e}[k] = \mathbf{x}_o[k] - \mathbf{x}_m[k], \tag{7}$$

$$\mathbf{\Gamma}[k] = \mathbf{I}_n \cdot \frac{\gamma}{k}, \ \gamma > 0, \tag{8}$$

тогда рекуррентный алгоритм настройки матрицы $\mathbf{A}$ записывается как

$$\mathbf{A}[k] = \mathbf{A}[k-1] + \mathbf{\Gamma}[k] \cdot \mathbf{e}[k] \cdot \mathbf{x}_m^{\mathrm{T}}[k]. \tag{9}$$

Окончание этапа идентификации происходит при малых отклонениях значений компонент матрицы $\mathbf{A}$, т.е. при условии $\left| a_{ij}[k] - a_{ij}[k-1] \right| < \delta$, для всех *i*, *j*.

В процессе расчетов с использованием рекуррентного метода стохастической аппроксимации лучшие результаты получены с использованием коэффициента настройки алгоритма $\gamma = 0{,}5$ и $\Delta t = 1$, при начальных значениях вектора состояний модели $\mathbf{x}_m[0] = [0 \quad 0{,}05 \quad 0 \quad 0]^{\mathrm{T}}$. Начальные и конечные значения компонентов матрицы $\mathbf{A}$ имеют следующий вид

$$\mathbf{A}[0] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \ \mathbf{A}[300] = \begin{bmatrix} 1{,}061 & -0{,}651 & 0{,}064 & 2{,}016 \cdot 10^{-3} \\ 0{,}012 & 0{,}356 & -9{,}77 \cdot 10^{-4} & 4{,}78 \cdot 10^{-4} \\ 0{,}087 & -0{,}081 & 0{,}51 & 2{,}4 \cdot 10^{-4} \\ -2{,}03 \cdot 10^{-5} & 2{,}57 \cdot 10^{-4} & 1{,}7 \cdot 10^{-6} & 0{,}5 \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Изменение значений компонентов матрицы $\mathbf{A}$ в процессе расчетов показано в таблице 1.

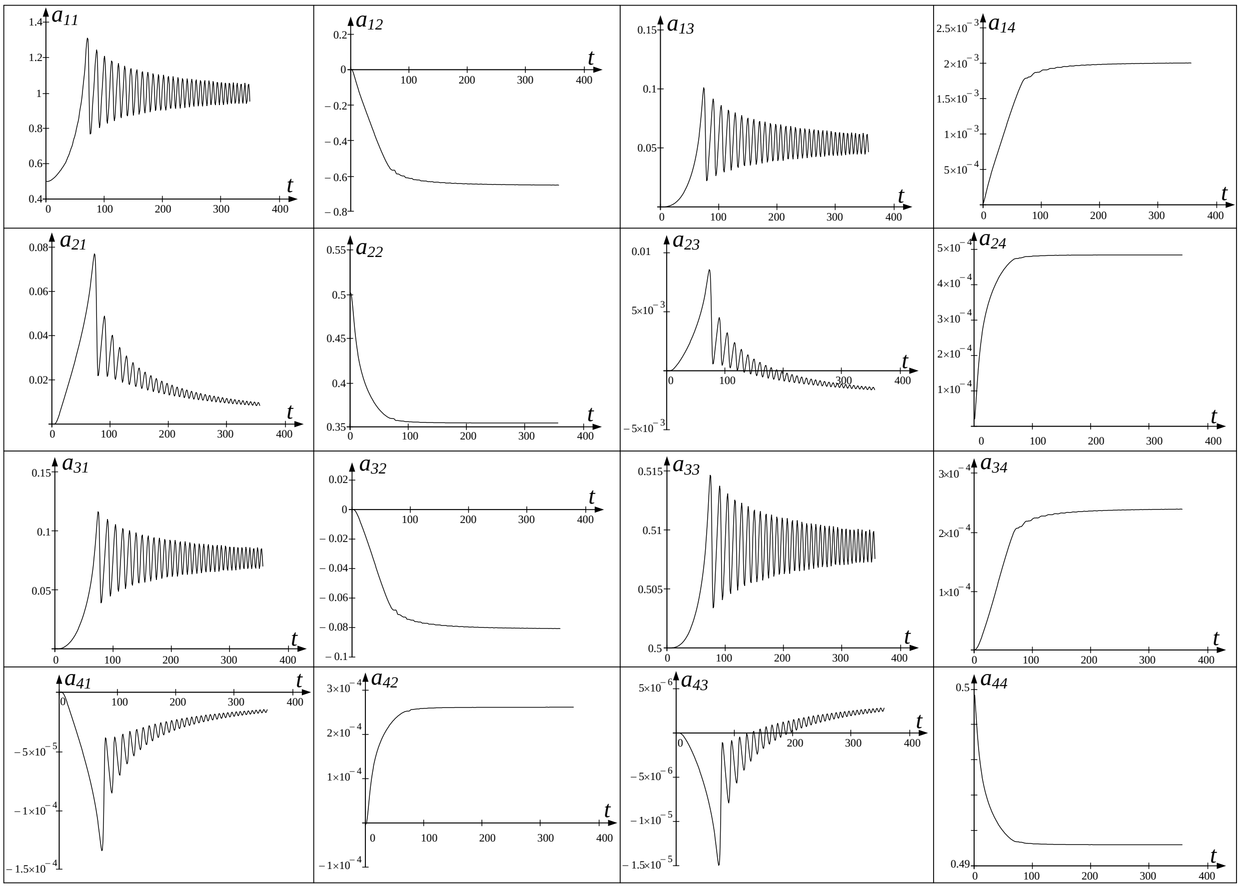
Структура полученных матриц (10) существенно отличается от структуры матрицы, полученной в результате линеаризации нелинейной модели движения (5). Время окончания этапа идентификации методом рекуррентной стохастической аппроксимации составило $t > 350$ с, что является недопустимо большим при перемещении судна, так как уже при $t = 300$ с изменяются внешние условия движения крупногабаритного объекта и требуется определение новых значений матрицы $\mathbf{A}$.

Согласно теории [5], точность метода стохастической аппроксимации может рассматриваться только при $t \to \infty$ [3], следовательно его нецелесообразно использовать при идентификации параметров модели для решения задач управления перемещением крупногабаритным объектом в реальном времени.

Целесообразно осуществить анализ эффективности более точных методов идентификации в системе управления, которые позволяют сохранять структуру матриц линеаризованной модели процесса перемещения судна на слипе, например метод наименьших квадратов [5].

Таблица 1.

Динамика подстройки значений компонентов матрицы $\mathbf{A}$ с использованием метода стохастической аппроксимации



2. Метод наименьших квадратов.

Использование метода наименьших квадратов для идентификации параметров матрицы $\mathbf{A}$ математической модели (4) позволило получить две системы линейных алгебраических уравнений для определения коэффициентов $a_{21}, a_{23}, a_{41}, a_{43}$

$$\begin{cases} a_{21}\sum\limits_{k=0}^{N} x_1^2[k] + a_{23}\sum\limits_{k=0}^{N} x_3[k]\cdot x_1[k] = \sum\limits_{k=0}^{N} \dot{x}_2[k]\cdot x_1[k] - \sum\limits_{k=0}^{N} b_1[k]\cdot x_1[k], \\ a_{21}\sum\limits_{k=0}^{N} x_1[k]\cdot x_3[k] + a_{23}\sum\limits_{k=0}^{N} x_3^2[k] = \sum\limits_{k=0}^{N} \dot{x}_2[k]\cdot x_3[k] - \sum\limits_{k=0}^{N} b_1[k]\cdot x_3[k], \end{cases} \tag{11}$$

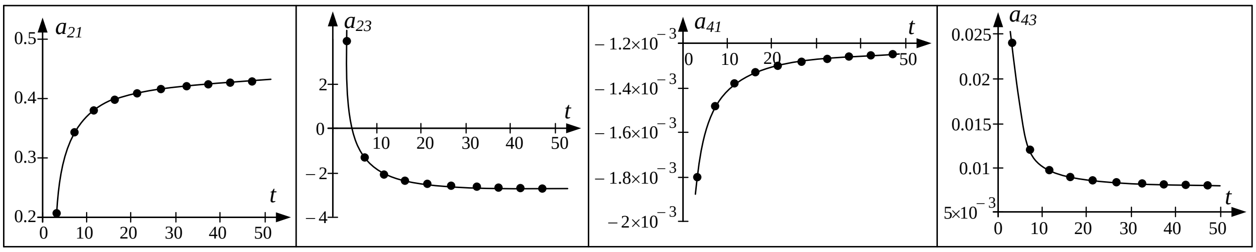
$$\begin{cases} a_{41}\sum\limits_{k=0}^{N} x_1^2[k] + a_{43}\sum\limits_{k=0}^{N} x_3[k]\cdot x_1[k] = \sum\limits_{k=0}^{N} \dot{x}_4[k]\cdot x_1[k] - \sum\limits_{k=0}^{N} b_2[k]\cdot x_1[k], \\ a_{41}\sum\limits_{k=0}^{N} x_1[k]\cdot x_3[k] + a_{43}\sum\limits_{k=0}^{N} x_3^2[k] = \sum\limits_{k=0}^{N} \dot{x}_4[k]\cdot x_3[k] - \sum\limits_{k=0}^{N} b_2[k]\cdot x_3[k], \end{cases} \tag{12}$$

где значения производных $\dot{x}_2[k]$ и $\dot{x}_4[k]$ определяются из соотношений $\dot{x}_2[k] = \frac{x_2[k] - x_2[k-1]}{\Delta t}$ и $\dot{x}_4[k] = \frac{x_4[k] - x_4[k-1]}{\Delta t}$ соответственно; $x_i[k]$, $i = \overline{1,4}$ – известные значения вектора состояний объекта $\mathbf{x}_0[k]$; $b_1[k] = K_1 \sum_{i=1}^{N} u_i[k]$ и $b_2[k] = K_2 \sum_{i=1}^{N} q_i \cdot u_i[k]$ характеризуют значения управлений на k -м шаге.

Изменение значений компонентов матрицы $\mathbf{A}$ в процессе расчетов показано в таблице 2.

Таблица 2.

Динамика подстройки значений компонентов матрицы $\mathbf{A}$ с использованием метода наименьших квадратов



Полученные в процессе использования метода наименьших квадратов значения компонентов матрицы $\mathbf{A}$ имеют следующий вид

$$\mathbf{A}[50] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0{,}423 & 0 & -2{,}66 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1{,}25 \cdot 10^{-3} & 0 & 8 \cdot 10^{-3} & 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Матрица $\mathbf{A}$ (13) при идентификации методом наименьших квадратов сохраняет структуру модели (4), а время окончания этапа идентификации $t > 40$ с, что соизмеримо с допустимым временем.

При изменении внешних условий перемещения крупногабаритного объекта необходимо снова активировать процесс идентификации. Условие активации этапа идентификации $|y_0(t) - y_m(t)| > \varepsilon$.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Исследование эффективности процедуры идентификации параметров модели перемещения судна на слипе рекуррентным методом стохастической аппроксимации подтвердило проблемы настройки алгоритма, связанные с выбором начальных расчетных значений и весовых коэффициентов, которые влияют как на его сходимость, так и на величину ошибки, а также выявило превышение допустимого времени, отведенного на оценку параметров модели. При идентификации параметров модели для адаптивного управления в реальном времени процессом перемещения крупногабаритного объекта целесообразно использовать метод наименьших квадратов.

Список использованной литературы

1. Омельчук А.А. Оптимізація процесів оперативного керування суднопідйомним комплексом типу сліп: дис. …кандидата техн. наук: 05.13.07 / Омельчук Антон Анатолійович. – Херсон, 2015. – 182 с.
2. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. / Д.П. Ким– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464с.
3. Omelchuk A.A. Optimal control of the ship's motion at the cross slipway / A.A. Omelchuk, G.V. Rudakova, O.V. Polivoda // Праці Одеського політехнічного університету. – 2015. – Вип. 3(47). – С. 75 – 84.
4. Райбман Н.С. Идентификация объектов управления (обзор) / Н.С. Райбман // Автоматика и телемеханика. – 1979. – Вып. 6. – С. 80 – 93.
5. Киричков В.Н. Автоматика и управление в технических системах. В 11-ти кн. Кн.2. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами / В.Н. Киричков; под ред. А.А. Краснопрошиной. – К.: Выща шк. 1990. – 263 с.