

DOI:10.22337/1524-5845-2017-13-3-77-85

ОЦЕНИВАНИЕ МАТРИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Р.Л. Лейбов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, РОССИЯ

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: В статье рассмотрены особенности оценивания матричных параметров кусочно-непрерывной модели по переходным процессам нелинейной модели объекта управления методом случайного поиска. Определен один из диапазонов возможного использования кусочно-непрерывной модели нелинейного объекта. Приведены результаты применения предлагаемого подхода при создании кусочно-непрерывной модели авиационного газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: нелинейный объект, кусочно-непрерывная модель, переходные процессы нелинейной модели, метод случайного поиска, диапазон возможного использования кусочно-непрерывной модели

NONLINEAR PLANT PIECEWISE-CONTINUOUS MODEL MATRIX PARAMETERS ESTIMATION

Roman L. Leibov

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA
Moscow Aviation Institute (National Research University) , Moscow, RUSSIA

Abstract: This paper presents a nonlinear plant piecewise-continuous model matrix parameters estimation technique using nonlinear model time responses and random search method. One of piecewise-continuous model application areas is defined. The results of proposed approach application for aircraft turbofan engine piecewise-continuous model formation are presented.

Keywords: Nonlinear plant, piecewise-continuous model, nonlinear model time responses, random search method, piecewise-continuous model application area

1. ВВЕДЕНИЕ

Для разработки алгоритмов управления, алгоритмов обнаружения, локализации, конкретизации и парирования отказов систем автоматического управления (САУ), а также для оценивания робастности этих систем и их алгоритмов используются линейные модели нелинейных объектов управления. Матричные параметры линейных моделей оцениваются по переходным процессам нелинейных моделей объектов управления. Несколько линейных моделей, матричные параметры которых должны оцениваться и сменяться друг

другом согласованно, составляют кусочно-линейную модель нелинейного объекта. Кусочно-непрерывная модель позволяет построить кусочно-линейную модель, состоящую из произвольного числа согласованных друг с другом линейных моделей. Точность такой кусочно-линейной модели может быть максимально приближена к точности кусочно-непрерывной модели. В данной работе рассматриваются структура, особенности оценивания матричных параметров и один из диапазонов возможного использования кусочно-непрерывной модели нелинейного объекта управления.

2. НЕЛИНЕЙНАЯ, ЛИНЕЙНАЯ И КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНАЯ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Нелинейная модель объекта управления, имеет вид [1], [2], [3]

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}^p, \mathbf{u}^p, \mathbf{w}^p). \quad (1)$$

Здесь \mathbf{x}^p — вектор состояния, \mathbf{u}^p — вектор управления, \mathbf{w}^p — вектор внешних воздействий, а \mathbf{f} — нелинейная вещественная векторная функция. Координаты вектора состояния (переменные состояния) такого объекта управления, например авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), это частоты вращения роторов, температуры и давления в различных сечениях проточной части двигателя. Координаты вектора управления (переменные управления) — это расход топлива, изменяемые геометрические характеристики проточной части двигателя, в частности, площадь критического сечения реактивного сопла и углы поворота направляющих аппаратов вентилятора и компрессора. Координаты вектора внешних воздействий (переменные внешних воздействий) это угол отклонения рычага управления двигателем (управляющее воздействие), а также высота и скорость полета (переменные внешних условий). Постоянное управляющее воздействие и внешние условия, входящие в вектор ${}_s\mathbf{w}$, определяют установившийся режим работы двигателя (рабочую точку), которому соответствуют вектор установившихся значений переменных управления ${}_s\mathbf{u}$ и вектор установившихся значений переменных состояния ${}_s\mathbf{x}$.

В небольшой окрестности произвольного r -ого установившегося режима нелинейный объект управления можно [1], [2], [3] приближенно описать с помощью линейной модели в нормированных отклонениях от установившихся значений

$$\dot{\mathbf{x}}^n = {}^r\mathbf{A}(\mathbf{x}^n - {}^r_s\mathbf{x}^n) + {}^r\mathbf{B}(\mathbf{u}^n - {}^r_s\mathbf{u}^n), \quad (2)$$

где \mathbf{x}^n — n -мерный вектор нормированных переменных состояния, а \mathbf{u}^n — m -мерный вектор нормированных переменных управления

$$x_i^n = \frac{x_i}{\max |{}_s x_i|}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

$$u_i^n = \frac{u_i}{\max |{}_s u_i|}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (4)$$

${}^r\mathbf{A}$, ${}^r\mathbf{B}$ — матрицы динамической линейной модели для r -ого установившегося режима; ${}^r\mathbf{A}$, ${}^r\mathbf{B}$, $r = 1, 2, \dots, R$ матрицы динамической кусочно-линейной модели; ${}^r_s\mathbf{u}^n$, ${}^r_s\mathbf{x}^n$, $r = 1, 2, \dots, R$ вектора статической характеристики объекта управления.

Пусть у кусочно-непрерывной модели вектора нормированных установившихся значений переменных управления ${}_s\mathbf{u}^n$ и переменных состояния ${}_s\mathbf{x}^n$, а также матрицы \mathbf{A} и \mathbf{B} определяются следующим образом

$${}_s\mathbf{u}^n = {}^r_s\mathbf{u}^n + \theta({}^{r+1}_s\mathbf{u}^n - {}^r_s\mathbf{u}^n), \quad r = 1, \dots, R-1, \quad (5)$$

$${}_s\mathbf{x}^n = {}^r_s\mathbf{x}^n + \theta({}^{r+1}_s\mathbf{x}^n - {}^r_s\mathbf{x}^n), \quad r = 1, \dots, R-1, \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = {}^r\mathbf{A} + \theta({}^{r+1}\mathbf{A} - {}^r\mathbf{A}), \quad r = 1, \dots, R-1, \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = {}^r\mathbf{B} + \theta({}^{r+1}\mathbf{B} - {}^r\mathbf{B}), \quad r = 1, \dots, R-1, \quad (8)$$

где $0 \leq \theta < 1$, поскольку

$$\theta = \frac{\|\mathbf{x}^n\| - \|{}^r_s\mathbf{x}^n\|}{\|{}^{r+1}_s\mathbf{x}^n\| - \|{}^r_s\mathbf{x}^n\|},$$

$$\frac{\|\mathbf{x}^n\|}{\|{}^R_s\mathbf{x}^n\|} \leq \frac{\|{}^{r+1}_s\mathbf{x}^n\|}{\|{}^r_s\mathbf{x}^n\|}, \quad r = 1,$$

$$\frac{\|{}^r_s\mathbf{x}^n\|}{\|{}^R_s\mathbf{x}^n\|} \leq \frac{\|\mathbf{x}^n\|}{\|{}^r_s\mathbf{x}^n\|} \leq \frac{\|{}^{r+1}_s\mathbf{x}^n\|}{\|{}^R_s\mathbf{x}^n\|}, \quad r = 2, \dots, R-2,$$

$$\frac{\| {}^r_s \mathbf{x}^n \|}{\| {}^R_s \mathbf{x}^n \|} \leq \frac{\| \mathbf{x}^n \|}{\| {}^R_s \mathbf{x}^n \|}, \quad r = R - 1. \quad (9)$$

3. ОЦЕНИВАНИЕ МАТРИЦ КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА

Для оценивания матриц кусочно-непрерывной модели, соответствующей R соседним установившимся режимам, для которых известны вектора нормированных установившихся значений переменных управления и переменных состояния

$${}^r_s \mathbf{u}^n, {}^r_s \mathbf{x}^n, \quad r = 1, 2, \dots, R,$$

используются переходные процессы нелинейной модели объекта, то есть наборы значений нормированного вектора состояния

$${}^{\text{НЛ}} \mathbf{x}^n(t_k), \quad k = 0, \dots, N,$$

а также нормированного вектора управления

$${}^{\text{НЛ}} \mathbf{u}^n(t_k), \quad k = 0, \dots, N - 1$$

в дискретные моменты времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_k, t_{k+1}, \dots$, причем $t_{k+1} = t_k + \Delta t$, где Δt это шаг дискретности.

Переходные процессы для переменных управления в разомкнутой системе управления представляют собой несколько последовательных ступенчатых воздействий, включающих в себя линейные функции времени, наклоны которых примерно соответствует переходным процессам в замкнутой системе управления. Эти линейные функции соединяют значения, соответствующие нескольким соседним установившимся режимам.

Оценивание матриц кусочно-непрерывной модели может быть сведено к задаче нелинейного программирования вида

$${}^r \mathbf{A}, {}^r \mathbf{B}, \quad r = 1, 2, \dots, R:$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N [\mathbf{x}^n(t_k) - {}^{\text{НЛ}} \mathbf{x}^n(t_k)]^T {}_x \mathbf{W}(t_k)}{\sum_{k=1}^N [{}^{\text{НЛ}} \mathbf{x}^n(t_k) - {}^{\text{НЛ}} \mathbf{x}^n(t_0)]^T {}_x \mathbf{W}(t_k)}} \\ \sqrt{\frac{[{}^{\text{НЛ}} \mathbf{x}^n(t_k) - \mathbf{x}^n(t_k)]}{[{}^{\text{НЛ}} \mathbf{x}^n(t_k) - {}^{\text{НЛ}} \mathbf{x}^n(t_0)]}} \end{array} \right.$$

$$\mathbf{x}^n(t_{k+1}) = \mathbf{x}^n(t_k) + \Delta t \mathbf{A} [\mathbf{x}^n(t_k) - {}^r_s \mathbf{x}^n] + \Delta t \mathbf{B} [{}^{\text{НЛ}} \mathbf{u}^n(t_k) - {}^r_s \mathbf{u}^n],$$

$${}^r_s \mathbf{u}^n = {}^r_s \mathbf{u}^n + \theta ({}^{r+1}_s \mathbf{u}^n - {}^r_s \mathbf{u}^n),$$

$${}^r_s \mathbf{x}^n = {}^r_s \mathbf{x}^n + \theta ({}^{r+1}_s \mathbf{x}^n - {}^r_s \mathbf{x}^n),$$

$$\mathbf{A} = {}^r \mathbf{A} + \theta ({}^{r+1} \mathbf{A} - {}^r \mathbf{A}),$$

$$\mathbf{B} = {}^r \mathbf{B} + \theta ({}^{r+1} \mathbf{B} - {}^r \mathbf{B}),$$

$$\theta = \frac{\| \mathbf{x}^n \| - \| {}^r_s \mathbf{x}^n \|}{\| {}^{r+1}_s \mathbf{x}^n \| - \| {}^r_s \mathbf{x}^n \|},$$

$$\frac{\| \mathbf{x}^n \|}{\| {}^R_s \mathbf{x}^n \|} \leq \frac{\| {}^{r+1}_s \mathbf{x}^n \|}{\| {}^r_s \mathbf{x}^n \|}, \quad r = 1,$$

$$\frac{\| {}^r_s \mathbf{x}^n \|}{\| {}^R_s \mathbf{x}^n \|} \leq \frac{\| \mathbf{x}^n \|}{\| {}^R_s \mathbf{x}^n \|} \leq \frac{\| {}^{r+1}_s \mathbf{x}^n \|}{\| {}^R_s \mathbf{x}^n \|}, \quad r = 2, \dots, R - 2,$$

$$\frac{\| {}^r_s \mathbf{x}^n \|}{\| {}^R_s \mathbf{x}^n \|} \leq \frac{\| \mathbf{x}^n \|}{\| {}^R_s \mathbf{x}^n \|}, \quad r = R - 1,$$

$$k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad \left. \right\}. \quad (10)$$

Здесь ${}_x \mathbf{W}(t_k)$, $k = 1, \dots, N$ положительно определенные диагональные весовые матрицы, а начальное значение вектора состояния кусочно-непрерывной модели

$$\mathbf{x}^n(t_0) = {}^{\text{НЛ}} \mathbf{x}^n(t_0).$$

Задача нелинейного программирования решается методом случайного поиска. В качестве начального приближения используются матрицы кусочно-линейной

модели [1]. Случайный поиск осуществляется в диапазоне ± 0.1 от начального значения каждого из элементов матриц ${}^r \mathbf{A}, {}^r \mathbf{B}$, $r=1,2,\dots,R$.

Ошибки кусочно-непрерывной модели рассчитываются по каждой из переменных состояния

$${}_i \Delta_{\infty} = \max_{k=1,\dots,N} |x_i^n(t_k) - {}^{\text{НЛ}} x_i^n(t_k)|, \quad i=1,\dots,n. \quad (11)$$

4. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР ОЦЕНИВАНИЯ МАТРИЦ КУСОЧНО- НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ

Разработанный метод применяется для определения матриц кусочно-непрерывной модели по переходным процессам нелинейной модели двухвального двухконтурного турбореактивного авиационного ГТД в разомкнутой САУ. Переходные процессы нелинейной модели начинаются на установившемся режиме, соответствующем максимальному режиму работы при значении угла отклонения рычага управления двигателем $\alpha_{\text{руд}} = 68^\circ$, а затем соответствуют переходным процессам для переменных управления в разомкнутой системе, которые представляют собой несколько последовательных ступенчатых воздействий. Каждое из этих воздействий соответствует изменению значения угла отклонения рычага управления двигателем $\alpha_{\text{руд}} = 60^\circ$, $\alpha_{\text{руд}} = 50^\circ$, $\alpha_{\text{руд}} = 40^\circ$, $\alpha_{\text{руд}} = 30^\circ$, $\alpha_{\text{руд}} = 25^\circ$.

В рассматриваемом примере высота и скорость полета равны нулю. Четыре переменные управления ($m=4$) соответствуют расходу топлива в основной камере сгорания $G_{\text{то}}$, площади критического сечения реактивного сопла $F_{\text{кр}}$, углу поворота направляющих аппаратов вентилятора $\varphi_{\text{нав}}$ и углу поворота направляющих аппаратов компрессора $\varphi_{\text{нак}}$.

Пять переменных состояния объекта управления ($n=5$) соответствуют частоте вращения вентилятора двигателя $n_{\text{в}}$, частоте вращения компрессора двигателя $n_{\text{к}}$, давлению торможения за компрессором $P_{\text{к}}^*$, давлению торможения за турбиной $P_{\text{т}}^*$ и температуре торможения за турбиной $T_{\text{т}}^*$.

Вектора нормированных установившихся значений управления и состояния для перечисленных выше режимов

$$\begin{aligned} {}_6 \mathbf{u}^n &= [1, 0.4515, 0, 0]^T, \\ {}_6 \mathbf{x}^n &= [1, 1, 1, 1]^T, \\ {}_5 \mathbf{u}^n &= [0.9442, 0.4441, -0.0893, 0]^T, \\ {}_5 \mathbf{x}^n &= [0.9741, 0.9834, 0.9656, 0.9783, 0.9790]^T, \\ {}_4 \mathbf{u}^n &= [0.7713, 0.4441, -0.3741, 0]^T, \\ {}_4 \mathbf{x}^n &= [0.9176, 0.9414, 0.8355, 0.8618, 0.9225]^T, \\ {}_3 \mathbf{u}^n &= [0.5724, 0.4441, -0.7402, -0.1072]^T, \\ {}_3 \mathbf{x}^n &= [0.8449, 0.8991, 0.6724, 0.7125, 0.8507]^T, \\ {}_2 \mathbf{u}^n &= [0.2880, 0.4441, -1, -0.2264]^T, \\ {}_2 \mathbf{x}^n &= [0.7231, 0.8399, 0.4505, 0.4787, 0.6900]^T, \\ {}_1 \mathbf{u}^n &= [0.1864, 0.4441, -1, -0.4019]^T, \\ {}_1 \mathbf{x}^n &= [0.6202, 0.7929, 0.3348, 0.3788, 0.6114]^T. \end{aligned}$$

Матрицы кусочно-непрерывной модели, соответствующие рассматриваемым соседним установившимся режимам, оцениваются с помощью (10) методом случайного поиска

$${}^6 \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1.8208 & 1.1770 & & & \\ 0.0697 & -1.6507 & & & \\ 9.7385 & 11.5191 & & & \\ 9.6711 & 3.5115 & & & \\ 2.9867 & -6.8163 & & & \\ & & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 \\ -20.1171 & -13.1868 & & & 0 \\ -5.5917 & -19.3568 & & & 0 \\ -3.4159 & -3.1171 & -30.0422 & & \end{bmatrix},$$

$${}^6\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.6093 & 0.8201 & -0.1387 & 0.1788 \\ 0.4454 & 0.5736 & -0.0387 & -0.2204 \\ 10.8333 & -40.9063 & 2.6207 & 1.7204 \\ 7.1854 & -39.0036 & 2.1503 & 0.5060 \\ 16.0831 & 3.7726 & -0.8053 & -1.2318 \end{bmatrix},$$

$${}^5\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2.0989 & 1.0320 \\ 0.1873 & -1.8560 \\ 9.7914 & 11.5725 \\ 9.7835 & 3.6756 \\ 2.8621 & -6.9600 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -20.0301 & -13.1503 & 0 \\ -5.5720 & -19.2893 & 0 \\ -3.4286 & -3.2235 & -29.9508 \end{bmatrix},$$

$${}^5\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.5647 & 2.2715 & -0.4239 & 0.2514 \\ 0.6004 & 0.5737 & 0.1194 & -0.2008 \\ 14.2718 & -47.2595 & 2.2365 & -1.5488 \\ 9.2314 & -44.3070 & 2.4864 & -2.1365 \\ 17.9006 & 1.8247 & -0.4124 & -1.6880 \end{bmatrix},$$

$${}^4\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1.6270 & 1.2922 \\ 0.0649 & -2.0180 \\ 11.2399 & 12.6572 \\ 10.4333 & 4.6735 \\ 2.8845 & -6.9473 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -19.7169 & -11.5759 & 0 \\ -5.0344 & -18.7211 & 0 \\ -3.4493 & -3.2843 & -29.9813 \end{bmatrix},$$

$${}^4\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.5052 & 0.9260 & -0.0118 & 0.1786 \\ 0.5892 & 0.5448 & -0.0591 & -0.2817 \\ 13.7952 & -31.6776 & 1.7159 & 3.6744 \\ 11.4705 & -32.1760 & 1.7430 & 2.3281 \\ 16.7038 & -3.8779 & 0.9959 & 2.3086 \end{bmatrix},$$

$${}^3\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2.3519 & 1.7300 \\ 0.1079 & -2.8400 \\ 13.2768 & 14.6302 \\ 9.7373 & 4.2626 \\ 2.8276 & -3.5453 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -18.6061 & -10.3892 & 0 \\ -4.2626 & -15.6408 & 0 \\ -3.5453 & -3.2605 & -30.0025 \end{bmatrix},$$

$${}^3\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.5980 & 1.8505 & -0.1297 & 0.1247 \\ 0.7252 & -0.1001 & -0.1947 & -0.3271 \\ 13.2790 & -20.5240 & 0.0531 & 1.8069 \\ 9.1333 & -19.3408 & -0.2446 & 1.4193 \\ 25.5911 & -9.0120 & -1.0117 & -3.2289 \end{bmatrix},$$

$${}^2\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1.7279 & 1.9401 \\ 0.5693 & -2.5114 \\ 12.8263 & 14.9954 \\ 11.4961 & 6.4707 \\ 2.8544 & -6.8024 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -18.7520 & -11.9884 & 0 \\ -4.5819 & -17.7373 & 0 \\ -3.4658 & -3.2515 & -29.9919 \end{bmatrix},$$

$${}^2\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.9329 & 0.4549 & 0.1908 & 0.0990 \\ 0.5745 & -0.0184 & -0.1399 & -0.1354 \\ 11.4558 & -10.6185 & -0.1116 & 2.1666 \\ 6.7190 & -12.0750 & -0.2529 & 1.0489 \\ 32.4494 & -3.5233 & 2.0774 & -2.2863 \end{bmatrix},$$

$${}^1\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1.9944 & 0.9354 \\ 1.2707 & -2.6249 \\ 12.5384 & 14.7670 \\ 11.4520 & 6.6307 \\ 2.0775 & -7.2209 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -18.6298 & -11.9759 & 0 \\ -4.5503 & -17.6851 & 0 \\ -4.9486 & -3.4682 & -29.4721 \end{bmatrix},$$

$${}^1\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.7743 & 1.1148 & -0.2212 & -0.0727 \\ 1.4304 & -0.5693 & 0.2746 & -0.0064 \\ 14.3639 & -10.6913 & -2.1411 & 1.2968 \\ 8.7236 & -12.4513 & -0.8109 & 0.8420 \\ 38.9908 & -2.4710 & -0.1666 & 1.5486 \end{bmatrix}.$$

При оценивании $k = 1, \dots, 2001$, $\Delta t = 0.025$, а весовые матрицы единичные.

На рис. 1 показаны переходные процессы в разомкнутой САУ нормированной переменной состояния x_5^n нелинейной модели и кусочно-непрерывной модели, которая описывает нелинейный объект в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

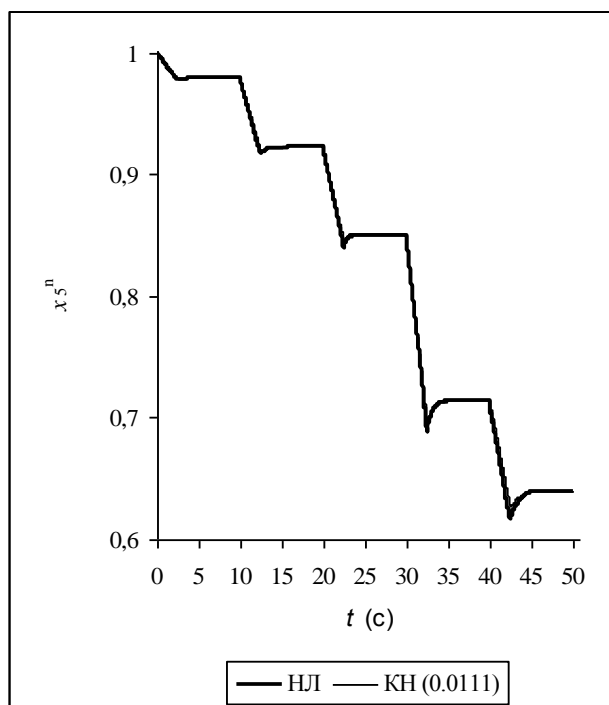


Рисунок 1. Переходные процессы в разомкнутой САУ нормированной переменной состояния x_5^n нелинейной (НЛ) модели и кусочно-непрерывной (КН) модели, которая описывает нелинейный объект в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

Ошибки нормированных переменных состояния x_1^n , x_2^n , x_3^n , x_4^n и x_5^n кусочно-непрерывной модели в разомкнутой САУ 0.0108, 0.0026, 0.0057, 0.0111.

На рис. 2, 3, 4, 5, 6 показаны переходные процессы в замкнутой САУ нормированных переменных состояния x_1^n , x_2^n , x_3^n , x_4^n и x_5^n нелинейной и кусочно-непрерывной моделей при изменении значения угла отклонения рычага управления двигателем от $\alpha_{руд} = 68^\circ$ до $\alpha_{руд} = 25^\circ$, а затем от $\alpha_{руд} = 25^\circ$ до $\alpha_{руд} = 68^\circ$.

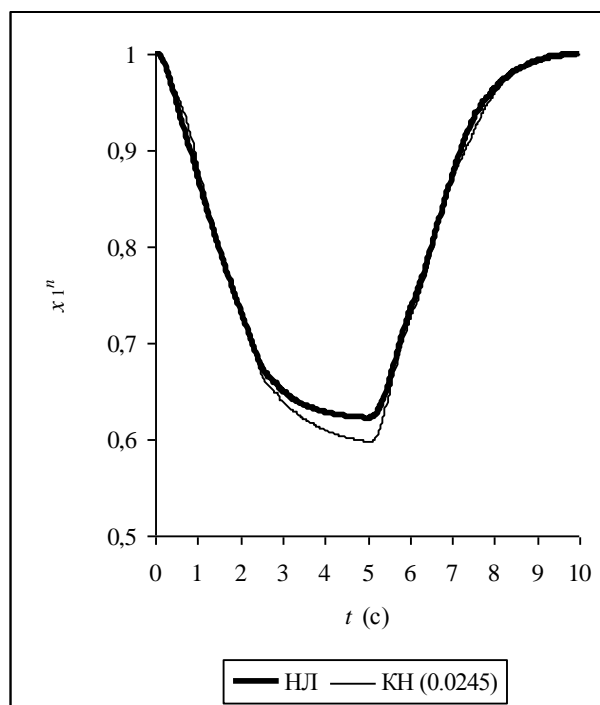


Рисунок 2. Переходные процессы в замкнутой САУ нормированной переменной состояния x_1^n нелинейной (НЛ) модели и кусочно-непрерывной (КН) модели в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

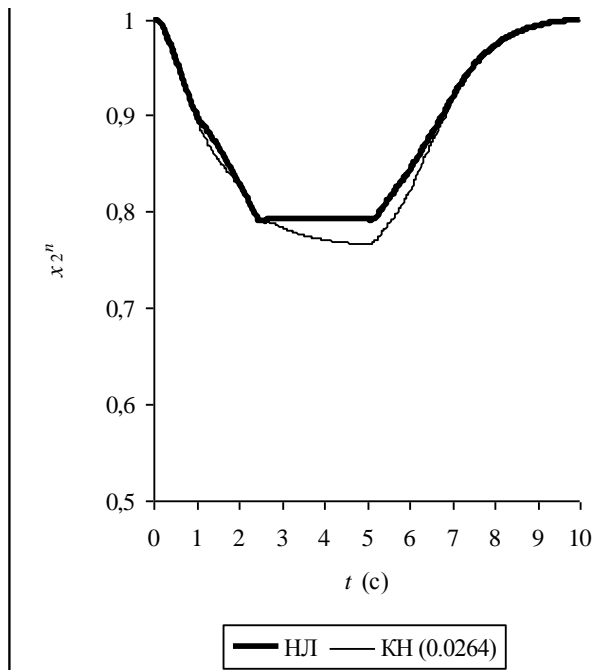


Рисунок 3. Переходные процессы в замкнутой САУ нормированной переменной состояния x_2^n нелинейной (НЛ) модели и кусочно-непрерывной (КН) модели в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

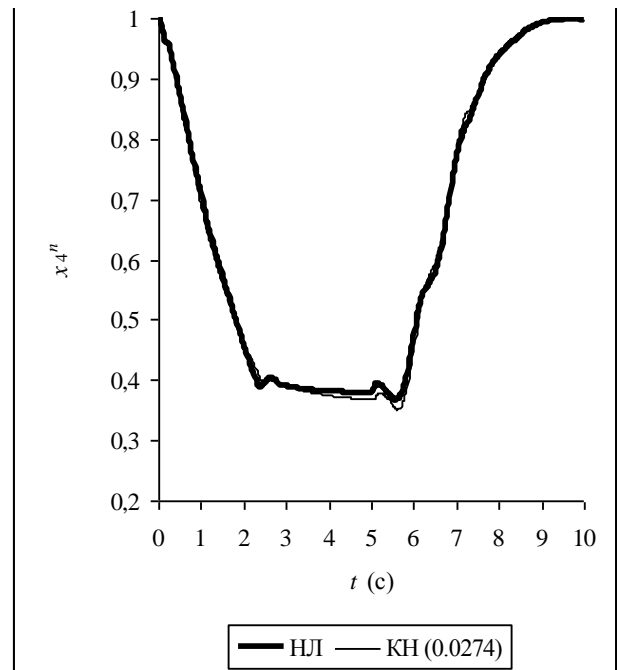


Рисунок 5. Переходные процессы в замкнутой САУ нормированной переменной состояния x_4^n нелинейной (НЛ) модели и кусочно-непрерывной (КН) модели в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

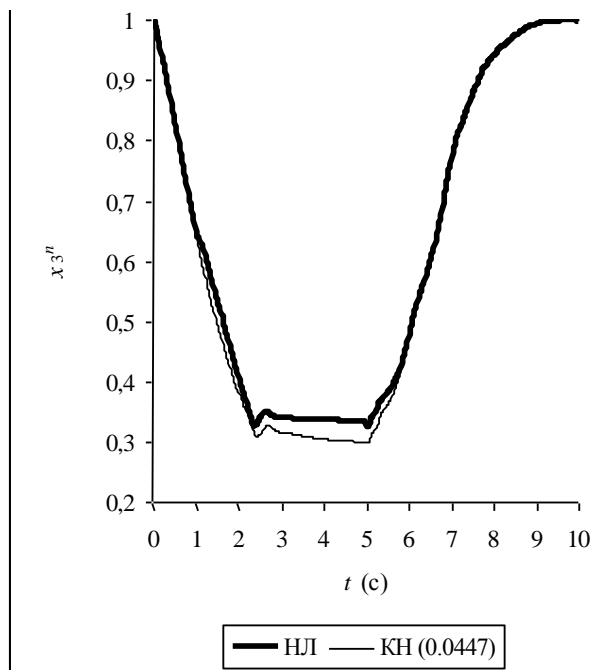


Рисунок 4. Переходные процессы в замкнутой САУ нормированной переменной состояния x_3^n нелинейной (НЛ) модели и кусочно-непрерывной (КН) модели в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

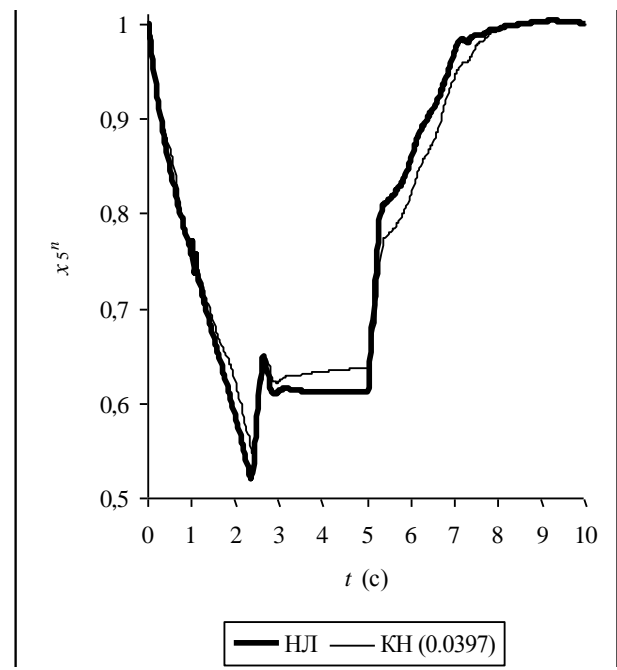


Рисунок 6. Переходные процессы в замкнутой САУ нормированной переменной состояния x_5^n нелинейной (НЛ) модели и кусочно-непрерывной (КН) модели в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

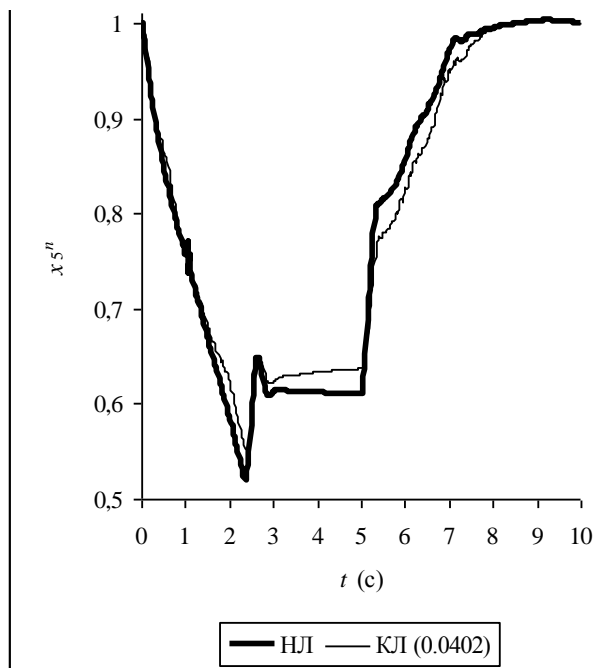


Рисунок 7. Переходные процессы в замкнутой САУ нормированной переменной состояния x_5^n нелинейной (НЛ) модели и кусочно-линейной (КЛ) модели, полученной из кусочно-непрерывной модели через каждые 0.1 с, в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

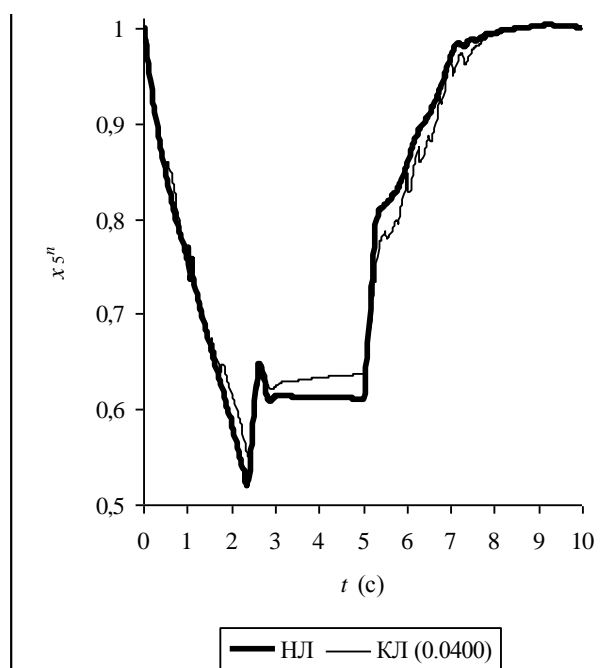


Рисунок 8. Переходные процессы в замкнутой САУ нормированной переменной состояния x_5^n нелинейной (НЛ) модели и

кусочно-линейной (КЛ) модели, полученной из кусочно-непрерывной модели через каждые 0.25 с, в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

На рис. 7, 8 показаны переходные процессы в замкнутой САУ нормированной переменной состояния x_5^n нелинейной модели и кусочно-линейной модели, полученной из кусочно-непрерывной модели.

Для получения кусочно-линейных моделей из кусочно-непрерывной модели через каждые 0.1 с и 0.25 с фиксируются вектора нормированных установившихся значений переменных управления u^n и переменных состояния sx^n , а также матрицы **A** и **B** кусочно-непрерывной модели. При увеличении этого интервала ошибки нормированной переменной состояния x_5^n кусочно-линейной модели растут и становятся неприемлемыми. Ошибки других нормированных переменных состояния кусочно-линейной модели растут гораздо медленнее.

Ошибки кусочно-непрерывной и кусочно-линейной моделей по каждой из переменных состояния рассчитываются с помощью (11).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика оценивания матричных параметров кусочно-непрерывной модели нелинейного объекта управления.

В качестве исходных данных для оценивания матриц кусочно-непрерывной модели с помощью алгоритма случайного поиска, используются переходные процессы переменных управления и переменных состояния нелинейной модели объекта.

Результаты данной работы могут быть применены при разработке алгоритмов управления нелинейными объектами, которые приближенно описываются с помощью кусочно-непрерывных и кусочно-

линейных моделей, а также алгоритмов обнаружения отказов датчиков и исполнительных устройств в их САУ.

Engineering, 2015, Volume 11, Issue 2, pp. 107-130.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лейбов Р.Л.** Прикладные методы теории управления. – М.: АСВ, 2014. – 192 с.
2. **Лейбов Р.Л.** Методика построения кусочно-линейной модели нелинейного объекта. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2013, Volume 9, Issue 4, pp. 186-198.
3. **Лейбов Р.Л.** Использование билинейной модели для улучшения свойств кусочно-линейной модели нелинейного объекта управления. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2015, Volume 11, Issue 2, pp. 107-130.

Лейбов Роман Львович, кафедра прикладной математики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26; кафедра систем автоматического управления летательных аппаратов, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); 125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, дом 4, тел./факс +7(499)183-59-94; e-mail: r_leibov@mtu-net.ru.

Roman L. Leibov, Department of Applied Mathematics, National Research Moscow State University of Civil Engineering; 26, Yaroslavskoe Highway, 129337, Moscow, RUSSIA; Department of Control Systems, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoe Highway, 125993, Moscow, RUSSIA, tel./fax +7(499)183-59-94; e-mail: r_leibov@mtu-net.ru.

REFERENCES

1. **Leibov R.L.** Prikladnye Metody Teorii Upravlenija [Applied Methods of Control Theory]. Moscow, ASV Publishing House, 2014, 192 pages.
2. **Leibov R.L.** Metodika Postroenija Kusochno-Linejnoj Modeli Nelinejnogo Objekta [Method of Construction of Piecewise Linear Model of Nonlinear Object]. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2013, Volume 9, Issue 4, pp. 186-198.
3. **Leibov R.L.** Ispol'zovanie Bilinejnoj Modeli dlja Uluchshenija Svojstv Kusochno-Linejnoj Modeli Nelinejnogo Objekta Upravlenija [Use of a Bilinear Model to Improve the Properties of a Piecewise Linear Model of a Nonlinear Control Object]. // International Journal for Computational Civil and Structural