

характеристик вычислительного процесса, осуществляемое для деталей и элементов конструкций определенного класса. Полученные результаты могут быть положены в основу расчета всех деталей с аналогичными конфигурацией и условиями нагружения.

В настоящее время накоплен достаточно большой опыт расчетов НДС и ресурса деталей погружных пневмоударников [3]. Это позволяет рекомендовать рассмотренный выше подход к апробации в проектных расчетах деталей других типов, применяемых в машинах импульсного действия.

#### Библиографический список

1. Когаев, В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В. П. Когаев. М. : Машиностроение, 1993.
2. Погодин-Алексеев, Г. И. Динамическая прочность и хрупкость металлов / Г. И. Погодин-Алексеев. М. : Машиностроение, 1966.
3. Доронин, С. В. Оценка конструктивных решений и расчетное обоснование рациональных параметров деталей машин ударного действия для разрушения горных пород / С. В. Доронин, Д. В. Косолапов // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 10. С. 47–53.

S. V. Doronin, D. V. Kosolapov

### STRESS-STRAIN STATE MODELING AND LIFETIME AT PERCUSSIVE-CYCLIC LOADING ESTIMATION

*The methodical approach to lifetime estimation of machines details at percussive-cyclic loading is offered. The realization is based on sharing the corrected linear hypothesis of tireless damages accumulation and schematization the irregular transitional loading processes methods, calculated by the finite elements method.*

*Keywords: percussive-cyclic loading, lifetime, modeling.*

УДК 681.51

А. Т. Когут

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ С ПРИБЛИЖЕННЫМИ АЛГОРИТМАМИ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОДНИМ КЛАССОМ ОБЪЕКТОВ

*Рассмотрена методика синтеза локальных регуляторов при управлении многомерными объектами, содержащими несколько нелинейных элементов. Исследована устойчивость замкнутых систем при реализации приближенных алгоритмов формирования управляющих воздействий. Проведен сравнительный анализ полученных аналитических выражений и результатов имитационного моделирования.*

*Ключевые слова: объект, модель, система, регулятор, алгоритм, устойчивость.*

Задача исследования процессов управления в нелинейных системах вторым методом Ляпунова остается и в настоящее время достаточно актуальной [1], особенно если объект описывается многомерными моделями. В этом случае рекомендуется разделять сложную систему на подсистемы и для каждой из них решать локальную задачу управления, а затем объединить их по условию обеспечения требуемого движения всей системы [2]. Законы управления для каждой из подсистем отыскиваются по условиям устойчивости, полученным на основе локальных функций Ляпунова, для полной системы применяется векторная функция Ляпунова.

В данной статье автором предлагается не разделять общую желаемую траекторию на локальные, что не всегда возможно, особенно в системах пространственного движения, а использовать в качестве модели объекта такие переменные состояния, у которых каждая координата зависит не более чем от одного управления. Для этих целей можно применять, например, преобразование

Луенбергера [3]. Синтез алгоритмов управления в этом случае осуществляется исходя из условия обеспечения устойчивости желаемого движения на основе достаточно известных и хорошо изученных скалярных функций Ляпунова [4]. Траекторное управление тогда сводится к обратной задаче динамики [3], которую можно решать с помощью приближенных методов, построенных на линеаризации и использующих первые [5] и вторые производные достаточно гладкой нелинейной функции [6].

**Постановка задачи.** Пусть стационарная нелинейная система описывается уравнениями

$$\dot{y}(t) = A y(t) + B \varphi[u(t)], \quad y(0) = y_0, \quad (1)$$

$$e(t) = g(t) - y(t), \quad (2)$$

$$u(t) = C e(t). \quad (3)$$

Здесь  $y(t)$ ,  $u(t)$ ,  $e(t)$  и  $g(t)$  –  $n$ -мерные векторы состояния, управления, ошибки и входного воздействия соответственно, поэтому все рассматриваемые в данной статье матрицы имеют размер  $n \times n$ . Собственные значения си-

стемной матрицы  $A$  имеют отрицательные вещественные части, т. е. линейная часть (ЛЧ) объекта устойчива. Матрица  $B$  – диагональная с ненулевыми элементами  $b_i$  ( $i = 1, n$ ), и если в конкретной системе число управлений меньше  $n$  или некоторый вектор  $u_j$  не влияет на объект, то соответствующий элемент  $b_j = 0$ . Матрица  $C$  задает коэффициенты передачи регулятора.

Вектор-функция  $\varphi[u(t)]$  состоит из элементов  $\varphi_i[u_i(t)]$ , удовлетворяющих условиям

$$\begin{aligned} \varphi_i(0) = 0, \quad u_i \varphi_i(u_i) > 0 \quad \text{при } u_i \neq 0, \\ \varphi_i(u_i) \in C^2, \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (4)$$

Допустим, что для получения алгоритмов функционирования устройства управления (УУ) используется следующая методика синтеза систем непрерывного траекторного управления. Пусть желаемой траекторией движения является  $n$ -мерная вектор-функция  $\dot{g}(t)$ , а для скорости изменения вектора состояния  $\dot{y}(t)$  должно выполняться условие  $\dot{y}(t) = \dot{g}(t)$ . Поэтому, следуя методу обратной задачи динамики [5], подставим  $\dot{g}(t)$  вместо  $\dot{x}(t)$  в уравнение модели объекта (1). В полученном выражении при заданном  $\dot{g}(t)$  и наблюдаемом  $x(t)$  неизвестное управление  $u(t)$  будет являться аргументом нелинейной функции  $\varphi(u)$ . В явном виде  $u(t)$  можно вычислить, применяя для  $\varphi(u)$  полиномиальную аппроксимацию [6], формулы линеаризации которой учитывают и высшие производные.

Основным требованием к замкнутым системам при реализации в УУ предлагаемых автором алгоритмов является обеспечение устойчивости процессов управления. Для этого вначале получим условие устойчивости при управлении непрерывным объектом (1) линейным регулятором общего вида (3), а затем распространим его на частные случаи формирования  $u(t)$  приближенными методами первого и второго порядков.

**Анализ устойчивости систем траекторного управления.** Траекторное управление, при котором требуется обработка выходной переменной  $y(t)$  заданного движения  $g(t)$ , относится к вынужденным режимам. Покажем, что устойчивость таких систем автоматизированного управления (САУ) можно исследовать так же, как и устойчивость автономных систем.

Способность системы отслеживать траекторию  $g(t)$  полностью определяется динамическими свойствами ее линейной части. Например, если частотная характеристика ЛЧ является фильтром нижних частот, то высокочастотные составляющие сигнала  $g(t)$ , находящиеся за пределами полосы пропускания, подавляются, а на выходе будет присутствовать только низкочастотная часть спектра воздействия  $g(t)$ .

Следовательно, динамические свойства систем можно исследовать при формировании желаемой траектории  $g(t)$  некоторой эталонной моделью, описываемой уравнением

$$\dot{g}(t) = A g(t), \quad g(0) = g_0. \quad (5)$$

Допустим, что степень близости процесса  $y(t)$  к траектории  $g(t)$  оценивается  $n$ -мерным вектором разности

$$x(t) = y(t) - g(t). \quad (6)$$

Тогда после дифференцирования левой и правой частей выражения (6) и подстановки вместо  $\dot{y}(t)$  и  $\dot{g}(t)$  фор-

мул (1) и (5) соответственно получим уравнения модели и устройства управления для новых переменных состояния  $x(t)$ :

$$\dot{x}(t) = A y(t) + B \varphi(u), \quad x(0) = x_0, \quad (7)$$

$$u(t) = -C x(t). \quad (8)$$

Исследование устойчивости стационарной автономной системы (7) с несколькими нелинейными элементами рекомендуется проводить с помощью функции Ляпунова вида [4]

$$V(x) = x^T L x + \sum_{i=1}^n q_i \int_0^{u_i} \varphi(\xi_i) d\xi_i. \quad (9)$$

Здесь  $L = L^T > 0$  – положительно определенная матрица,  $q_i$  ( $i = 1, n$ ) – произвольные положительные числа, и для характеристик нелинейных элементов  $\varphi_i(u_i)$  должны выполняться условия (4).

Производная по времени  $\dot{V}(x)$  будет

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T L x + x^T L \dot{x} + \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i(u_i) \dot{u}_i.$$

Допустим, что  $Q$  – диагональная матрица с ненулевыми элементами  $q_i$  ( $i = 1, n$ ), тогда

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T L x + x^T L \dot{x} + \dot{u}^T Q \varphi(u). \quad (10)$$

Скорость изменения управления  $\dot{u}$  в силу (8) равна  $-C \dot{x}$ , поэтому после подстановки в соотношение (10) формулы (7) и ряда преобразований получим

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) = x^T (A^T L + L A) x + \\ + \varphi^T(u) B^T L x + x^T L B \varphi(u) - \\ - x^T A^T C^T Q \varphi(u) - \varphi^T(u) B^T C^T Q \varphi(u). \end{aligned}$$

Введем матричное обозначение  $A^T L + L A = -P$  и сделаем следующие скалярные преобразования:

$$\varphi^T(u) B^T L x + x^T L B \varphi(u) = 2\varphi^T(u) (LB)^T x,$$

$$x^T A^T C^T Q \varphi(u) = \varphi^T(u) Q^T C A x.$$

Тогда производная  $\dot{V}(x)$  запишется в виде

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) = -x^T P x - \\ - \varphi^T(u) B^T C^T Q \varphi(u) + \\ + 2\varphi^T(u) \left[ (LB)^T - 0,5Q^T C A \right] x. \end{aligned} \quad (11)$$

Выражение (11) представляет собой квадратичную форму. Согласно теореме Ляпунова об асимптотической устойчивости, производная  $\dot{V}(x)$  должна быть знакоопределенной отрицательной функцией. В соответствии с рекомендациями [4] воспользуемся критерием Сильвестра для установления положительной определенности функции  $-\dot{V}(x)$ . Поскольку линейная часть системы (7) устойчива, то матрица  $P$  положительно определена и первые  $n$  неравенств критерия Сильвестра выполняются. Остается потребовать, чтобы

$$\begin{vmatrix} P & \left[ (LB)^T - 0,5Q^T C A \right]^T \\ -\left[ (LB)^T - 0,5Q^T C A \right] & B^T C^T Q \end{vmatrix} > 0,$$

откуда

$$\begin{aligned} B^T C^T Q > \left[ (LB)^T - 0,5Q^T C A \right] \times \\ \times P^{-1} \left[ (LB)^T - 0,5Q^T C A \right]^T. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, после определения матричного коэффициента передачи регулятора  $C$  необходимо обеспе-

чить выполнение неравенства (12) путем выбора всех параметров  $q_i > 0$ . Тогда система траекторного управления является устойчивой и будет обрабатывать желаемые входные воздействия  $g(t)$ .

**Определение условий устойчивости систем при формировании управления приближенными алгоритмами.** В системах траекторного управления должно выполняться условие  $\dot{y}(t) = \dot{g}(t)$ , поэтому вместо модели (1) запишем

$$\dot{g}(t) = A y(t) + B \varphi[u(t)]. \quad (13)$$

Допустим, что проектируется система с приближенными алгоритмами управления первого порядка, поэтому заменим вектор-функцию  $\varphi[u(t)]$  при  $\tau \rightarrow 0$  линейной аппроксимацией – непрерывным аналогом ряда Тейлора и получим

$$\dot{g}(t) = A y(t) + B \left\{ \varphi[u(t-\tau)] + \Phi'_\tau \delta u(t) \right\}. \quad (14)$$

Здесь  $\Phi'_\tau$  – матрица размером  $n \times n$  первых частных производных:

$$\Phi'_\tau = \begin{bmatrix} \varphi'_{1\tau} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \varphi'_{2\tau} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \varphi'_{n\tau} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где  $\varphi'_{i\tau} = \partial \varphi_i(u) / \partial u_i \Big|_{u=u(t-\tau)}$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Вектор  $\delta u(t)$  является разностью управлений

$$\delta u(t) = u(t) - u(t-\tau) \quad (16)$$

и при  $\tau \rightarrow 0$  для него справедливо, что  $\delta u(t) \approx \tau \dot{u}(t)$ .

Решение уравнения (14) представим в форме очевидной последовательности:

$$\begin{aligned} \tau B \Phi'_\tau \dot{u}(t) &= \dot{g}(t) - A y(t) - B \varphi[u(t)], \\ \tau B \Phi'_\tau \dot{u}(t) &= \dot{e}(t), \\ \tau B \Phi'_\tau u(t) &= e(t), \end{aligned} \quad (17)$$

Окончательно алгоритм формирования управления  $u(t)$  запишем в виде

$$u(t) = (\tau B \Phi'_\tau)^{-1} e(t). \quad (18)$$

В уравнении (17) матрицы  $B$  и  $\Phi'_\tau$  имеют диагональную форму, поэтому матричное выражение (17) можно заменить системой скалярных равенств

$$\tau b_i \varphi'_{i\tau} u_i(t) = e_i(t), \quad i = \overline{1, n},$$

откуда

$$u_i(t) = (\tau b_i \varphi'_{i\tau})^{-1} e_i(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (19)$$

Таким образом, многомерное УУ заменяется на  $n$  локальных регуляторов, в которых реализуется независимое управление в соответствии с алгоритмом (19). Матрица  $C$  в силу формулы (3) имеет вид

$$C = (\tau B)^{-1} K^{(1)}. \quad (20)$$

Здесь диагональные элементы матрицы  $K^{(1)}$  записываются следующим образом:

$$k_i^{(1)} = (\varphi'_{i\tau})^{-1}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (21)$$

Определим условия устойчивости системы при реализации в локальных регуляторах приближенных алгоритмов управления первого порядка. Левая часть неравенства (12) вместо матричного произведения  $B^T C^T Q$  будет

содержать скалярные элементы  $\tau^{-1} q_i k_i^{(1)}$ , которые должны быть положительными. Поэтому при положительных  $\tau$  и  $q_i$  достаточными условиями устойчивости будут являться требования, чтобы

$$k_i^{(1)} > 0 \text{ или } \varphi'_{i\tau} > 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (22)$$

Допустим, что в системе формируются приближенные алгоритмы управления второго порядка. В этом случае в соответствии с методикой полиномиальной аппроксимации [6] вместо уравнения (13) запишем

$$\dot{g}(t) = A y(t) + B \left\{ \varphi[u(t-\tau)] + \left[ \Phi'_\tau + 0,5 \Phi''_\tau (\delta \otimes I_n) \right] \Delta u(t) \right\}. \quad (23)$$

Здесь символом  $\otimes$  обозначено кронекеровское произведение матриц [3];  $\Phi''_\tau$  – матрица размером  $n \times n^2$  вторых частных производных:

$$\Phi''_\tau = \begin{bmatrix} \varphi''_{1\tau} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \varphi''_{2\tau} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \varphi''_{n\tau} \end{bmatrix},$$

где  $\varphi''_{i\tau} = \partial^2 \varphi_i(u) / \partial u_i^2 \Big|_{u=u(t-\tau)}$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Алгоритм управления по аналогии с выражением (18) имеет следующий матричный вид:

$$u(t) = \left\{ \tau B \left[ \Phi'_\tau + 0,5 \Phi''_\tau (\delta \otimes I_n) \right] \right\}^{-1} e(t). \quad (24)$$

В формулы (23) и (24) входят вектор разности управлений  $\Delta u(t)$ , который определяется аналогично (16), и вектор  $\delta = v(t) - u(t-\tau)$ . При вычислении  $v(t)$  по аналитическим выражениям приближенного алгоритма первого порядка для вектора  $\delta$  справедлива запись

$$B \Phi'_\tau \delta = \dot{g}(t) - A y(t-\tau) - B \varphi[u(t-\tau)].$$

Введем обозначение

$$f(t) = B^{-1} \begin{pmatrix} \dot{g}(t) - A y(t-\tau) \\ -B \varphi[u(t-\tau)] \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Тогда по аналогии с выражениями (17) и (19) можно записать

$$\delta_i = (\varphi'_{i\tau})^{-1} f_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (26)$$

где  $f_i$  является  $i$ -м элементом вектора-функции  $f(t)$ .

Матрицу  $C$  коэффициентов передачи представим в виде

$$C = (\tau B)^{-1} K^{(21)}. \quad (27)$$

Матрицы  $\Phi'_\tau$  и  $\Phi''_\tau$  содержат только по одному ненулевому элементу в каждой строке, поэтому матричное выражение (24) заменяется на  $n$  скалярных, а матрица  $K^{(21)}$  станет диагональной с элементами

$$k_i^{(21)} = (\varphi'_{i\tau} + 0,5 \varphi''_{i\tau} \delta_i)^{-1}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (28)$$

После подстановки вместо  $\delta_i$  формулы (26) получим соотношение для коэффициента передачи  $i$ -го локального регулятора

$$k_i^{(21)} = \frac{2\varphi'_{i\tau}}{f_i \varphi''_{i\tau} + 2(\varphi'_{i\tau})^2}. \quad (29)$$

Аналогично алгоритмам первого порядка устойчивость замкнутой системы с приближенными алгоритмами второго порядка можно обеспечить при положительности коэффициентов передачи  $k_i^{(21)}$  всех локальных ре-

гуляторов, а если учесть, что и  $\varphi'_{it} > 0$ , то соблюдение неравенств

$$f_i \varphi''_{it} + 2(\varphi'_{it})^2 > 0, \quad i = \overline{1, n} \quad (30)$$

является достаточным условием устойчивости процессов траекторного управления.

**Пример расчета.** Реализация приближенных алгоритмов в многомерных системах приводит к локальному траекторному управлению каждой координатой только одним воздействием, поэтому рассмотрим объект, описываемый уравнением

$$\dot{y} = ay + b \operatorname{th}(\beta u), \quad y(0) = y_0. \quad (31)$$

При моделировании используются следующие значения параметров:

$$a = -20, \quad b = 225, \quad \beta = 0,0055.$$

Нелинейный элемент при выбранном  $\beta$  аппроксимирует функцию  $\operatorname{sat} u$  и может рассматриваться как устройство, ограничивающее сигнал на входе линейной части. В работе [7] исследованы различные алгоритмы управления этим апериодическим звеном и желаемая траектория  $g(t)$  выбрана для случая оптимального ПИ-регулятора.

Методику построения областей и процедуру проверки выполнения условий устойчивости (22) и (30) поясним на примере реализации приближенного метода первого порядка. В соответствии с выражением (19) для объекта (31) можно записать

$$\begin{aligned} \dot{u}(t) &= (\tau b)^{-1} \operatorname{ch}^2[\beta u(t - \tau)] \times \\ &\times \{g(t) - a y(t - \tau) - b \operatorname{th}[\beta u(t - \tau)]\}, \\ u(0) &= u_0, \end{aligned} \quad (32)$$

где время запаздывания  $\tau = 0,01$ .

Области устойчивости для замкнутых систем траекторного управления в осях  $[y(0), u(0)]$  имеют следующий вид (рис. 1). Моделирование проводится на интервале времени  $T = [0, 2]$  при различных начальных значениях  $y(0) = y_0$  для дифференциального уравнения объекта (31) и отклонениях  $u(0) = u_0$  для алгоритма (32). Условие устойчивости (22) выполняется, так как  $\varphi'(u) > 0$  и коэффициент передачи регулятора  $k^{(1)} = [\varphi'(u)]^{-1}$  остается положительным. Расходящиеся процессы получаются только при достаточно больших  $u_0$ , когда  $\varphi'(u_0) \rightarrow 0$  и  $k^{(1)} \rightarrow \infty$ , что вызвано появлением численной неустойчивости при моделировании непрерывных замкнутых систем.

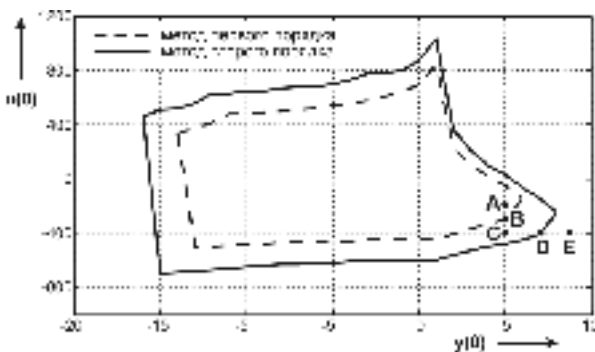


Рис. 1. Области устойчивости исследуемых замкнутых систем

Свойства системы, связанные с сохранением или потерей устойчивости, можно объяснить на основе поведения функции  $\varphi'(t) = \varphi'[u(t)]$  при различных началь-

ных значениях (рис. 2, 3). Так, в соответствии с рис. 2, а выполняется условие  $\varphi'(t) > 0$ , а следовательно, и условие (22), поэтому точка  $A$  ( $y(0) = 5, u(0) = -200$ ) на рис. 1 принадлежит области устойчивости. На границе устойчивости, например в точке  $B$ , характер функции качественно не изменяется: обе  $\varphi'(t)$  стремятся к одному установившемуся значению только в начале интегрирования, затем  $\varphi'(t) \approx 0$  (рис. 2, б) и происходит потеря устойчивости. В области расходящихся процессов поведение функции  $\varphi'(t)$  отличается: для точки  $C$  ( $y(0) = 5, u(0) = -305$ ) с момента времени  $t = 0,0315$  функция  $\varphi'(t) = 0$  (рис. 3, а).

Область устойчивости при реализации в системе приближенного алгоритма второго порядка также показана на рис. 1. Условие устойчивости имеет вид (30), поэтому свойства системы можно оценить по поведению функции

$$F(t) = f(t) \varphi''(t) + 2[\varphi'(t)]^2$$

(рис. 3, 4). При затухающих процессах в той же точке  $C$  и на границе устойчивости, например, в точке  $D$  с координатами  $y(0) = 5, u(0) = -410$ , характер функции  $F(t)$  одинаков и обе стремятся к установившемуся значению 0,85, но для области устойчивости  $F(t)$  всегда положительна (рис. 3, б), а на границе значение  $F(t) = 0$  только при  $t = 0,05$  (рис. 4, а). В области расходящихся процессов с момента времени  $t = 0,031$ , функция  $F(t)$  всегда равна нулю (рис. 4, б).

Таким образом, экспериментально подтверждена достоверность условия устойчивости (22) и неравенства (30) для приближенных алгоритмов управления первого и второго порядка соответственно. Из результатов имитационного моделирования также следует, что при нахождении систем на границе устойчивости выполняются равенства

$$\begin{aligned} \varphi'[u(t)] &= 0, \\ f[u(t), t] \varphi''[u(t)] + 2\{\varphi'[u(t)]\}^2 &= 0. \end{aligned}$$

Использовать их для аналитического определения областей устойчивости достаточно сложно, так как они соблюдаются в разные моменты времени. Тем не менее можно говорить о преимуществе приближенного алгоритма, использующего вторую производную. Системы с регулятором первого порядка теряют устойчивость, если  $\varphi' \leq 0$ , но при этом возможно выполнение условия (30), как это и происходит, например, в точке  $C$  (см. рис. 3, а). Более широкой областью устойчивости обладает и исследуемая система с алгоритмом управления второго порядка, что и подтверждают приведенные на рис. 1 результаты имитационного моделирования.

Таким образом, в данной статье рассматривалась задача траекторного управления непрерывным многомерным нелинейным объектом, описываемым переменными состояниями, когда каждая координата зависит только от одного управляющего воздействия. На основе скалярной функции Ляпунова получены достаточные условия абсолютной устойчивости желаемого движения системы, использующей линейные законы управления.

Нелинейная вектор-функция управления с помощью методики полиномиальной аппроксимации заменялась на линейные, содержащие частные производные как первого, так и второго порядков. На их основе были сформированы приближенные алгоритмы, которые при рассматриваемом классе объектов подвергались декомпозиции и многомер-

ное устройство управления заменялось локальными регуляторами. Для коэффициентов передачи регуляторов, реализующих приближенные алгоритмы, получены достаточные условия устойчивости. Моделирование систем и результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность полученных теоретических выражений.

Таким образом, проведенные исследования говорят о целесообразности описания объектов рассмотренным выше классом моделей, приводящих к формированию достаточно простых алгоритмов локальных регуляторов и условий устойчивости замкнутых систем.

### Библиографический список

1. Тхай, В. Н. IX Международный семинар «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» /

В. Н. Тхай // Автоматика и телемеханика. 2007. № 8. С. 3.  
 2. Шильяк, Д. Децентрализованное управление сложными системами / Д. Шильяк. М. : Мир, 1994.  
 3. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Т. 2: Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д. П. Ким. М. : Физматлит, 2004.  
 4. Точные методы исследования нелинейных систем автоматического управления / под ред. Е. П. Попова. М. : Машиностроение, 1971.  
 5. Рубан, А. И. Адаптивное управление с идентификацией / А. И. Рубан. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1983.  
 6. Когут, А. Т. Полиномиальная аппроксимация в некоторых задачах оптимизации и управления / А. Т. Когут ; Ом. гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2003.  
 7. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. М. : Лаборатория базовых знаний, 2004.

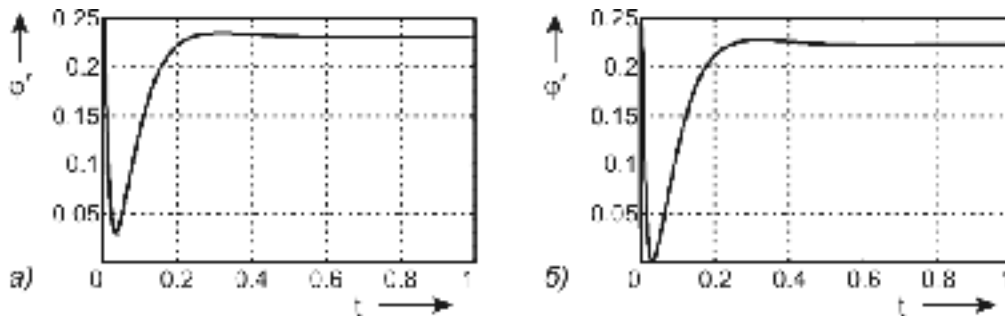


Рис. 2. Графики функций  $\varphi'(t)$  при различных начальных условиях

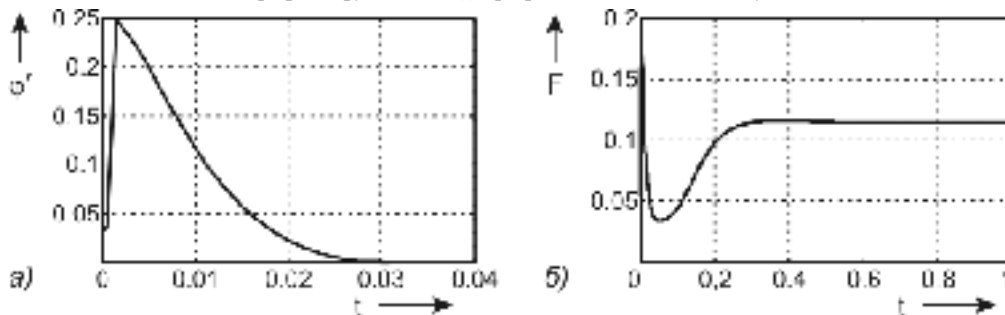


Рис. 3. Графики функций  $\varphi'(t)$  (а) и  $F(t)$  (б) при различных начальных условиях

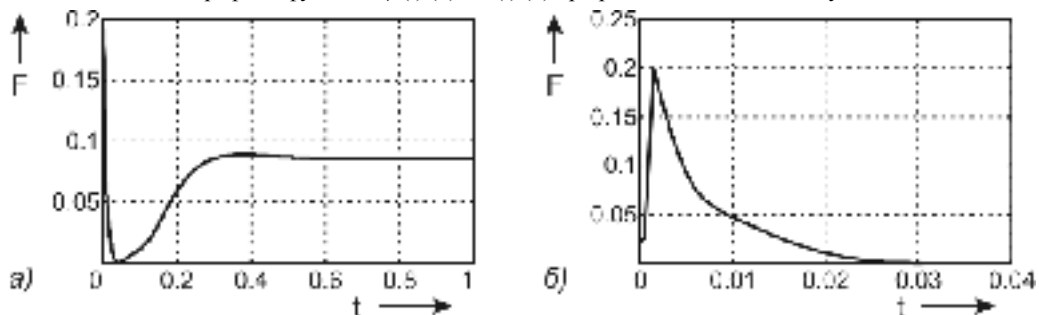


Рис. 4. Графики функций  $F(t)$  при различных начальных условиях  $y(0) = y_0$  и  $u(0) = u_0$

A. T. Kogut

## ANALYSIS OF SYSTEM STABILITY WITH APPROXIMATE ALGORITHMS OF PATH CONTROL OF ONE CLASS OBJECTS

The local regulator synthesis method for multivariate control objects containing several nonlinear elements is examined. The stability of closed loop systems is analyzed under realization of approximate algorithms for control impact building. The acquired analytic forms are compared with simulation results.

Keywords: object, model, system, regulator, algorithm, stability.