

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 4 (2020)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и
теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов Т. А.,	<i>к.т.н., доцент (Россия)</i>
Оспанова Н. Н.,	<i>к.п.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD, доцент</i>
Шокубаева З. Ж.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

М. А. Бейсенби, С. О. Ахметова, Н. М. Кусикова, А. Темирбек

Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Нур-Султан

УПРАВЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВИМИ РЕЖИМАМИ ОБЪЕКТОВ С m ВХОДАМИ И С n ВЫХОДАМИ В КЛАССЕ КАТАСТРОФ «ЛАСТОЧКИН ХВОСТ» N

В статье излагается метод построения и исследования систем управления с повышенным потенциалом робастной устойчивости линейными динамическими объектами с неопределенными параметрами в классе катастроф ласточкин хвост. Показано, что система управления m -входами и n -выходами с повышенным потенциалом робастной устойчивости обеспечивает устойчивость при любых изменениях неопределенных параметров.

Ключевые слова: система управления, градиентно-скоростной метод, вектор-функции Ляпунова, с одним входом, с одним выходом, робастная устойчивость, режим неустойчивости.

Введение

В настоящее время, актуальной проблемой является создание системы управления, обеспечивающей в некотором смысле гарантированно наилучшую защиту от неопределенности в знании свойств системы управления [1, 2, 3, 4, 5]. В известной постановке [6, 7, 8], исследование системы на робастную устойчивость состоит в указании ограничений на изменение параметров в рамках линейного принципа устойчивости [6, 8, 9].

В настоящее время общепризнано, что одним из основных свойств в линейных динамических объектов является порождение режима «неустойчивости» и потеря управляемости объекта в условиях неопределенности. Следует отметить, что неустойчивости в системах управления порождается в результате выхода неопределенных параметров системы за границы робастной устойчивости [1, 2, 6, 7].

В связи с этим, в условиях большой неопределенности предлагается разработать метод построения систем управления гарантированной защитой от режима «неустойчивости» в классе катастроф ласточкин хвост [10, 11]. Система

управления с увеличенным потенциалом робастной устойчивости исследуется градиентно – скоростным методом вектор – функции Ляпунова. [1, 12] показано, что система управления становятся устойчивой при любых изменениях неопределенных параметров и это гарантированно может защитить от режима «неустойчивости» в системах управления объектами с m -входами и n -выходами.

Пусть система управления с m – входами и с n – выходами описывается уравнением [6,13]:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m \quad (1)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояние системы управления; $u(t) \in \mathbb{R}^m$ – вектор-функция управляющих воздействий, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ матрица объекта управления размерности $n \times n$, $B \in \mathbb{R}^{m \times n}$ – матрица управления размерности $m \times n$;

Пусть матрицы A и B имеют следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & b_{nn} \end{pmatrix}$$

Закон управления задан в форме трех параметрических структурно устойчивых отображений (катастрофа ласточкин хвост) [10,11]:

$$u_i(t) = -\frac{1}{5}x_i^5 - \frac{1}{3}k_i^1 x_i^3 - \frac{1}{2}k_i^2 x_i^2 + k_i^3 x_i, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

Система (1) с учетом закона управления (2) в развернутой форме записывается

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{1}{5}b_{11}x_1^5 - \frac{1}{3}b_{11}k_1^1 x_1^3 - \frac{1}{2}b_{11}k_1^2 x_1^2 + (a_{11} + b_{11}k_1^3)x_1 + a_{12}x_2 + \dots, a_{1n}x_n \\ \frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_1 - \frac{1}{5}b_{22}x_2^5 - \frac{1}{3}b_{22}k_2^1 x_2^3 - \frac{1}{2}b_{22}k_2^2 x_2^2 + (a_{22} + b_{22}k_2^3)x_2 + \dots, a_{2n}x_n \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dx_n}{dt} = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots, -\frac{1}{5}b_{nn}x_n^5 - \frac{1}{3}b_{nn}k_n^1 x_n^3 - \frac{1}{2}b_{nn}k_n^2 x_n^2 + (a_{nn} + b_{nn}k_n^3)x_n \end{cases} \quad (3)$$

Установившиеся состояния системы (3) определяется решениями уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{1}{5}b_{11}x_1^5 - \frac{1}{3}b_{11}k_1^1x_1^3 - \frac{1}{2}b_{11}k_1^2x_1^2 + (a_{11} + b_{11}k_1^3)x_1 + a_{12}x_2 + \dots, a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 - \frac{1}{5}b_{22}x_2^5 - \frac{1}{3}b_{22}k_2^1x_2^3 - \frac{1}{2}b_{22}k_2^2x_2^2 + (a_{22} + b_{22}k_2^3)x_2 + \dots, a_{2n}x_n = 0 \\ \dots\dots\dots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots, -\frac{1}{5}b_{nn}x_n^5 - \frac{1}{3}b_{nn}k_n^1x_n^3 - \frac{1}{2}b_{nn}k_n^2x_n^2 + (a_{nn} + b_{nn}k_n^3)x_n = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Из (4) можно получить стационарные состояния [10,11]:

$$x_{1z}^1 = 0, x_{2z}^1 = 0, x_{3z}^1 = 0, \dots, x_{nz}^1 = 0, \quad (5)$$

$$x_{is}^2 = \sqrt[4]{\frac{1}{4}(a_{ii} + k_i^3)}, k_i^2 = 6 \left(\sqrt[4]{\frac{1}{4}(a_{ii} + k_i^3)} \right)^3, k_i^1 = \sqrt{\frac{1}{4}(a_{ii} + k_i^3)}, i = 1, \dots, n \quad (6)$$

и

$$x_{is}^3 = -\sqrt[3]{\frac{k_i^2}{6}}, \lambda = \sqrt[3]{\frac{k_i^2}{6}}, ki = \left(\sqrt[3]{\frac{k_i^2}{6}} \right)^2, (a_{ii} + b_{ii}k_i^3) = -4 \left(\sqrt[3]{\frac{k_i^2}{6}} \right)^4 \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

Исследуем устойчивость стационарного состояния (5). Из уравнения состояния (3) определяется компоненты вектора градиентов вектор функции Ляпунова $V(x) = (V_1(x) \ V(x), \dots, V_n(x))$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_i(x)}{\partial x_1} = -a_{i1}x_1, \frac{\partial V_i(x)}{\partial x_2} = -a_{i2}x_2, \dots, \frac{\partial V_i(x)}{\partial x_i} = \frac{1}{5}b_i x_i^5 + \frac{1}{3}b_i k_i^1 x_i^3 + \frac{1}{2}b_i k_i^2 x_i^2 - (a_i + b_i k_i^3)x_i, \\ \frac{\partial V_i(x)}{\partial x_{i+1}} = -a_{i,i+1} x_{i+1}, \dots, \frac{\partial V_i(x)}{\partial x_n} = a_n x_n, i = 1, \dots, n : \end{aligned} \quad (8)$$

Из (3) определяем компонентов разложение вектора скорости по координатам

$$\left(\frac{dx_i}{dt}\right)_{x_1} = -a_{i1}x_1, \left(\frac{dx_i}{dt}\right)_{x_2} = -a_{i2}x_2, \dots, \left(\frac{dx_i}{dt}\right)_{x_i} = -\frac{1}{5}b_{ii}x_i^5 - \frac{1}{3}b_{ii}k_i^1x_i^3 - \frac{1}{2}b_{ii}k_i^2x_i^2 - (a_{ii} + b_{ii}k_i^3)x_i, \\ \left(\frac{dx_i}{dt}\right)_{x_{i+1}} = -a_{i,i+1}x_{i+1}, \dots, \left(\frac{dx_i}{dt}\right)_{x_n} = a_{in}x_n, i = 1, \dots, n \quad (9)$$

Вычисляем полную производную по времени от вектор-функции Ляпунова, как скалярное произведение вектора градиента (8) на вектор скорости (9) [1,2,3,4].

$$\frac{dV(x)}{dt} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial V_i(x)}{\partial x_j} \left(\frac{dx_i}{dt}\right)_{x_j} \right) = \sum_{i=1}^n - (a_{i1}x_1)^2 - (a_{i2}x_2)^2 - \dots - \left(\frac{1}{5}b_{ii}x_i^5 + \frac{1}{3}b_{ii}k_i^1x_i^3 + \right. \\ \left. + \frac{1}{2}b_{ii}k_i^2x_i^2 - (a_{ii} + b_{ii}k_i^3)x_i\right)^2 - (a_{i,i+1}x_{i+1})^2 - \dots - (a_{in}x_n)^2 \quad (10)$$

Из (10) очевидно, что полная производная по времени от вектор-функции Ляпунова является гарантированно знако-отрицательной функцией, т.е. достаточное условие асимптотической устойчивости по Ляпунову для системы.

(3) гарантированно выполняются. По градиенту искомой вектор-функции Ляпунова (8) строим вектор-функции Ляпунова скалярной форме, для нахождения условия существования этой вектор-функций. Или вектор функции Ляпунова в скалярной форме можем переписать в виде:

$$V(x) = \frac{1}{30}b_{11}x_1^6 + \frac{1}{12}b_{11}k_1^1x_1^4 + \frac{1}{6}b_{11}k_1^2x_1^3 - \frac{1}{2}(a_{11} + b_{11}k_1^3)x_1^2 - \frac{1}{2}a_{12}x_2^2 - \frac{1}{2}a_{13}x_3^2 - \dots, - \\ - \frac{1}{2}a_{1n}x_n^2 + \frac{1}{30}b_{22}x_2^6 + \frac{1}{12}b_{22}k_2^1x_2^4 + \frac{1}{6}b_{22}k_2^2x_2^3 - \frac{1}{2}(a_{22} + b_{22}k_2^3)x_2^2 - \frac{1}{2}a_{21}x_1^2 - \frac{1}{2}a_{23}x_3^2 - \dots, - \\ - \frac{1}{2}a_{2n}x_n^2 - \dots, - \frac{1}{2}a_{n1}x_1^2 - \frac{1}{2}a_{n2}x_2^2 - \frac{1}{2}a_{n3}x_3^2 - \dots, + \frac{1}{30}b_{nn}x_n^6 + \frac{1}{12}b_{nn}k_n^1x_n^4 + \frac{1}{6}b_{nn}k_n^2x_n^3 - \\ - \frac{1}{2}(a_{nn} + b_{nn}k_n^3)x_n^2, \quad (11)$$

Условия положительной или отрицательной определенности функции (11) неочевидно, поэтому воспользуемся леммой Морса из теории катастроф [10, 11] и согласно лемме Морса функций Ляпунова (11) можем представить в виде квадратичной формы:

$$V(x) = [(a_{11} + b_{11}k_1^3) + a_{21} + a_{31} + \dots + a_{n1}]x_1^2 - [a_{12} + (a_{22} + b_{22}k_2^3) + a_{32} + \dots + a_{n2}]x_2^2 - \dots - [a_{1n} + a_{2n} + a_{3n} + \dots + (a_{nn} + b_{nn}k_n^3)]x_n^2, \quad (12)$$

Положительная определенность квадратичной формы (12) или необходимое условие асимптотической устойчивости стационарного состояния (5) определяется системой неравенств:

$$\begin{cases} a_{11} + b_{11}k_1^3 + a_{21} + a_{31} + \dots + a_{n1} < 0 \\ a_{12} + a_{22} + b_{22}k_2^3 + a_{32} + \dots + a_{n2} < 0 \\ \dots\dots\dots \\ a_{1n} + a_{2n} + a_{3n} + \dots + a_{nn} + b_{nn}k_n^3 < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Следует отметить, что при выполнении системы неравенств (13) стационарное состояние (5) будет существовать и является устойчивой. При условиях нарушения этих неравенств (13), появляются новые стационарные состояний (6), (7). Стационарные состояний (5) и (6), (7) одновременно не существует это результатами теории катастроф доказано [10, 11] стационарные состояний (6), (7) существует и появляются при потере устойчивости стационарного состояния (5). Такое замечательное свойство структурно-устойчивых отображений из теории катастроф используется для расширения области робастной устойчивости системы управления в условиях параметрической неопределенности.

Исследуем устойчивость стационарного состояние (6) градиентно-скоростным методом вектор функции Ляпунова. Стационарные состояния (6) лежит на поверхности сепаратисты [10, 11]. Для исследования систему (3) представляем в отклонениях относительно стационарного состояния (6)

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} = & -\frac{b_{11}}{5}x_1^5 - b_{11}\sqrt[4]{\frac{a_{11}+b_{11}k_1^3}{4}}x_1^4 - 2b_{11}\sqrt[4]{\frac{a_{11}+b_{11}k_1^3}{4}}x_1^3 - b_{11}(k_1^3 + a_{11}/b_{11})x_1 - \\
& - 6b_{11}\left(\sqrt[4]{\frac{a_{11}+b_{11}k_1^3}{4}}\right)^3 x_1^2 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \\
\frac{dx_2}{dt} = & -\frac{1}{5}b_{22}x_2^5 - b_{22}\sqrt[4]{\frac{a_{22}+b_{22}k_2^3}{4}}x_2^4 - 2b_{22}\sqrt[4]{\frac{a_{22}+b_{22}k_2^3}{4}}x_2^3 - 6b_{22}\left(\sqrt[4]{\frac{a_{22}+b_{22}k_2^3}{4}}\right)^3 x_2^2 - \\
& - b_{22}(k_2^3 + \frac{a_{22}}{b_{22}}) + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n, \\
& \dots\dots\dots \\
\frac{dx_n}{dt} = & a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots - \frac{1}{5}b_{nn}x_n^5 - b_{nn}\left(\sqrt[4]{\frac{a_{nn}+b_{nn}k_n^3}{4}}\right)^3 x_n^4 - 2b_{nn}\sqrt[4]{\frac{a_{nn}+b_{nn}k_n^3}{4}}x_n^3 - \\
& - 6b_{nn}\left(\sqrt[4]{\frac{a_{nn}+b_{nn}k_n^3}{4}}\right)x_n^2 - b_{nn}(k_n^3 + \frac{a_{nn}}{b_{nn}})x_n,
\end{aligned} \tag{14}$$

Определяем компонентом вектора градиентов от вектора функции Ляпунова $V(x) = (V_1(x), \dots, V_n(x))$ из уравнений состояния (14):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial V_i(x)}{\partial x_1} = & -a_{i1}x_1, \frac{\partial V_i(x)}{\partial x_2} = -a_{i2}x_2, \dots, \frac{\partial V_i(x)}{\partial x_i} = \frac{1}{5}b_{ii}x_i^5 + b_{ii}\sqrt[4]{\frac{a_{ii}+b_{ii}k_i^3}{4}}x_i^4 \\
& + 2b_{ii}\sqrt[4]{\frac{a_{ii}+b_{ii}k_i^3}{4}}x_i^3 + 6b_{ii}\left(\sqrt[4]{\frac{a_{ii}+b_{ii}k_i^3}{4}}\right)^3 x_i^2 + b_{ii}(k_i^3 + \frac{a_{ii}}{b_{ii}})x_i, \\
\frac{\partial V_i(x)}{\partial x_{i+1}} = & -a_{i,i+1}x_{i+1}, \dots, \frac{\partial V_i(x)}{\partial x_n} = -a_{in}x_n, i = 1, \dots, n
\end{aligned} \tag{15}$$

Из (14) определяем разложение компонентом вектора скорости по координатам системы:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{dx_1}{dt} \right)_{x_1} &= a_{i1}x_1, \left(\frac{dx_i}{dt} \right)_{x_3} = a_{i2}x_2, \dots, \left(\frac{dx_i}{dt} \right)_{x_i} = x_3, \dots, \left(\frac{dx_{n-1}}{dt} \right)_{x_n} = -\frac{1}{5}b_{ii}x_i^5 - b_{ii}\sqrt{\frac{a_{ii}+b_{ii}k_i^3}{4}}x_i^4 - \\ &- 2b_{ii}\sqrt{\frac{a_{ii}+b_{ii}k_i^3}{4}}x_i^3 - 6b_{ii}\left(\sqrt{\frac{a_{ii}+b_{ii}k_i^3}{4}}\right)^3x_i^2 - b_{ii}\left(k_i^3 - \frac{a_{ii}}{b_{ii}}\right)x_i, \\ \left(\frac{dx_i}{dt} \right)_{i1} &= a_{i,i+1}x_{i+1}, \dots, \left(\frac{dx_i}{dt} \right)_{x_n} = a_{in}x_n, i = 1, \dots, n \end{aligned} \right. \quad (16)$$

Вычисляется полные производные по времени от вектор – функции Ляпунова, как скалярное произведение вектора градиента (16) на вектор скорости (16):

$$\begin{aligned} \frac{dV(x)}{dt} &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial V_i(x)}{\partial x_j} \left(\frac{dx_j}{dt} \right) \right) = \\ &= \sum_{i=1}^n \left\{ -(a_{ii}x_i)^2 - (a_{i2}x_2)^2 - \dots, - \left[\left(\frac{1}{5}b_{ii}x_i^5 + b_{ii}\sqrt{\frac{a_{ii}+b_{ii}k_i^3}{4}}x_i^4 + 2b_{ii}\sqrt{\frac{a_{ii}+b_{ii}k_i^3}{4}}x_i^3 + 6b_{ii}\left(\sqrt{\frac{a_{ii}+b_{ii}k_i^3}{4}}\right)^3x_i^2 + b_{ii}\left(k_i^3 + \frac{a_{ii}}{b_{ii}}\right)x_i \right)^2 - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (a_{i,i+1}x_{i+1})^2 - \dots, - (a_{in}x_n)^2 \right\}, i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (17)$$

Из (17) очевидно, что полная производная по времени от вектор - функции Ляпунова является знакоотрицательной функцией. Теперь требуется получить необходимые условия существования функций Ляпунова с известным градиентом. По градиенту (15) построим вектор – функции Ляпунова в скалярной форме:

Таким образом система управления (3) обеспечивает устойчивость системы при любых изменениях неопределенных параметров системы.

При отрицательных значениях параметров существует и будет устойчивой стационарное состояния (5). Если нарушается система неравенств (13) появляется новое стационарное состояние (6) и это стационарное состояние существует и также является устойчивыми при выполнении системы неравенств (20).

Выводы

Способность системы управления сохранять устойчивость в условиях параметрической неопределенности в ограниченной области понимается как робастная устойчивость системы. В общей постановке исследование системы на робастную устойчивость состоит в указании ограничений на изменение параметров системы управления в ограниченной области и не гарантирует режимы «неустойчивости» при больших параметрических неопределенностях в системе.

В практических задачах, связанных с разработкой и созданием систем управления в условиях существенной параметрической неопределенности, создание систем управления с повышенным потенциалом робастной устойчивости является одним из ключевых факторов, гарантирующих системе управления от режима «неустойчивости». В связи с этим в статье предлагается метод построения системы управления в классе, катастроф ласточкин хвост и исследование их градиентно – скоростным методом вектор – функции Ляпунова.

Показано, что система управления обладает гарантированно широкой областью робастной устойчивости и исключает порождение режима «неустойчивости», т.е. система управления m- входами и n- выходами становится устойчивой при любых изменениях неопределенных параметров.

Список использованных источников

1 **Бейсенби, М. А.** Исследование робастной устойчивости систем автоматического управления методом функции А. М. Ляпунова. – Астана, 2015. – 204 с.

2 **Бейсенби, М., Ускенбаева, Г.** Конструкторские и исследовательские летательные аппараты с высоким потенциалом робастной системы контроля устойчивости в виде однопараметрического структурно-устойчивого отображения. Научно-исследовательский журнал прикладных наук, техники и технологий. V (12), № 5, 2016. – С. 599–605.

3 **Бейсенби, М., Ермакбаева, Ю., Шукирова, А., Шакирова, Р.** Проектирование систем управления с повышенным потенциалом для модели самолета. Journal Indian Journal of Science and Technology, V (8), № 32 б. – 2015.

4 **Бейсенби, М., Сатыбалдина, Д., Абдрахманова, Л.** Исследование системы с высоким потенциалом робастной устойчивости с помощью функции Ляпунова. Конференция по контролю, инженерии и информационным технологиям (CEIT'14), Сусс, Тунис. Труды IPCO. – 2014. – С. 140–145.

5 **Бейсенби, М., Мукатаев, Н.** Метод второй функции Ляпунова для построения системы управления с повышенным потенциалом робастной устойчивости в классе катастроф «Гиперболическая омбилика». Прикладная механика и материалы. 2015, V.799-800, P. 1132-1136, ISSN 1662-7482, 1660-9336.

6 **Поляк, Б. Т., Щербаков, П. С.** Робастная устойчивость и управление – М. : Наука, 2022. – 303 с.

7 **Дорато, П., Ведевалли, П.** Последние достижения в области надежного управления – Нью-Йорк : IEE Press, 1990.

8 **Кунцевич, В. М.** Управление в условиях неопределенности. Гарантирование результаты в задачах управления и идентификации, 2007. – 620 с.

9 Справочник по теории автоматического управления || Под ред. А. А. Красовского. – М. : физ.-мат.лит., 1987. – 712 с.

10 **Гилмор, Р.** Прикладная теория катастроф. В 2 – х томах. Т. 1. – М. : Мир, 1984.

11 **Постон, Т., Стюарт, И.** Теория катастроф и ее приложения. – М. : Наука, 2001, № 6.

12 **Бейсенби, М., Ускенбаева, Г.** Новый подход к созданию робастной стабилизации для линейной системы управления. Междунар. Конф. по достижениям в электронике и электротехнике - АЕЕТ 2014, стр. 11-18. 2014.

13 **Андриевский, Б. Р., Фрадков, А. Л.** Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB – СПб. : Наука, 2000. – 475 с.

References

1 **Bejsenbi, M. A.** Issledovanie robastnoj ustojchivosti sistem avtomaticheskogo upravleniya metodom funkcii A. M. Lyapunova. [Beisenbi, M. A. Investigation of robust stability of automatic control systems by the method of A. M. Lyapunov function]. – Astana, 2015. – 204 p.

2 **Beisenbi, M., Uskenbayeva, G.** Construction and Research Aircraft High Potential of Robust Stability Control System in the Form of Single – parameter Structurally Stable Mapping. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. [Beisenbi, M., Uskenbaeva, G. Konstruktorskie i issledovatel'skie letatel'nye apparaty s vysokim potencialom robastnoj sistemy kontrolya ustojchivosti v vide odnoparametricheskogo strukturno-ustojchivogo otobrazheniya. Nauchno-

issledovatel'skij zhurnal prikladnyh nauk, tekhniki i tekhnologij]. V (12), № 5, P. 599–605.

3 Beisenbi, M., Ermekbaeva, Y. U., Shukirova, A., Shakirova, R. Proektirovanie sistem upravleniya s povyshennym potencialom dlya modeli samoleta. Journal Indian Journal of Science and Technology. [Beisenbi M., Yermekbayeva J., Shukirova A., Shakirova R. Desing of Control Systems with the Increased Potential for Aircraft Model. Journal Indian Journal of Science and Technology]. – V (8), № 32 6. – 2015.

4 Beisenbi, M., Satibaldina, D., Abdrahmanova, L. Research of System with a High Potential For robust Stability by Lyapunov Function. Conference on Control, Engineering and Information Technology (CEIT'14), Sousse, Tunisia. Proceedings of IPCO. [Beisenbi M., Satybaldina D., Abdrahmanova L. Issledovanie sistemy s vysokim potencialom robustnoj ustojchivosti s pomoshch'yu funkcii Lyapunova. Konferenciya po kontrolyu, inzhenerii i informacionnym tekhnologiyam (CEIT'14), Suss, Tunis. Trudy IPCO]. – P. 140–145, 2014.

5 Beisenbi, M., Mukataev, N. Metod vtoroj funkcii Lyapunova dlya postroeniya sistemy upravleniya s povyshennym potencialom robustnoj ustojchivosti v klasse katastrof «Giperbolicheskaya ombilika». Prikladnaya mekhanika i materialy. [Beisenbi M., Mukataev N. The second Lyapunov function method ib construction of control system with the increased potential of robust stability in the class of catastrophes «Hyperbolic umbilic». Applied mechanics and materials]. – 2015, V.799-800, P. 1132-1136, ISSN 1662-7482, 1660-9336.

6 Polyak, B. T., Shcherbakov, P. S. Robastnaya ustojchivost' i upravlenie. [Polyak B. T., Shcherbakov P. S. Robust stability and control]. – Moscow : Nauka, P. 2022. – 303.

7 Dorato, P., Vedevali, Poslednie dostizheniya v oblasti nadezhnogo upravleniya. [Dorato P., Vedevali Recent Advances in Robust Control]. – New York: IEE press 1990.

8 Kuncovich, V. M. Upravlenie v usloviyah neopredelennosti. Garantirovanie rezul'taty v zadachah upravleniya i identifikacii. [Kuntsevich V. M. Management under uncertainty. Guaranteeing results in control and identification problems]. – P. 2007. – 620.

9 Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya || Pod red. A. A. Krasovskogo. [Handbook of automatic control theory // ed. by A. A. Krasovskiy]. M. : Phys. – math. lit., 1987. – 712 p.

10 Gilmor, R. Prikladnaya teoriya katastrof. [Gilmore R. Applied theory of catastrophes]. In 2 volumes. Vol. 1. – Moscow : Mir, 1984.

11 Poston, T., Styuart, I. Teoriya katastrof i ee prilozheniya. [Poston T., Stewart I. Theory of catastrophes and its applications]. Moscow : Nauka, 2001, No. 6.

12 **Beisenbi, M., Uskenbaeva, G.** Novyj podhod k sozdaniyu robustnoj stabilizacii dlya linejnoj sistemy upravleniya. Mezhdunar. Konf. po dostizheniyam v elektronike i elektrotekhnike. [Beisenbi M., Uskenbayeva G. The New Approach of Desing Robust Stabilit for Linear Control System. Of the Intl. Conf. on Advances in Electronics and Electrical Technology]. – AEET 2014. – P. 11–18.

13 **Andrievskij, B. R., Fradkov, A. L.** Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravlniya s primerami na yazyke MATLAB. [Andrievsky B. R., Fradkov A. L. Selected chapters of the theory of automatic control with examples in MATLAB] – SPb. : Nauka, 2000. – P. 475.

Материал поступил в редакцию 11.12.20.

М. А. Бейсенби, С. О. Ахметова, Н. М. Кисикова, А. Темірбек

«Қарлығаштың құйрығы» апат классында М кірістерімен N шығысы бар объектілердің тұрақсыз режимдерін басқаруды жүргізу

Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ.
Материал баспаға 11.12.20 түсті.

M. A. Beisenbi, S. O. Akmetova, N. M. Kisikova, A. Temirbek

Control of unstable modes of objects with M inputs and with N outputs in the dovetail catastrophe class

Eurasian National University, L. N. Gumilyov,
Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan.
Material received on 11.12.20.

Мақалада апаттар класында белгісіз параметрлері бар сызықтық динамикалық объектілермен робасты орнықтылықтың жоғары потенциалы бар басқару жүйелерін құру және зерттеу әдісі баяндалады ласточкин хвост. М-кіріс және N-шығуларды басқару жүйесі робасты орнықтылықтың жоғары әлеуеті бар, белгісіз параметрлердің кез келген өзгерістері кезінде орнықтылықты қамтамасыз етеді.

Кілтті сөздер: басқару жүйесі, градиентті-жылдамдық әдісі, Ляпунов векторы-функциясы, бір кірумен, бір шығумен, робасты тұрақтылық, тұрақсыздық режимі.

The article describes a method for constructing and studying control systems with increased robust stability potential by linear dynamic objects with indefinite parameters in the dovetail catastrophe class. It is shown that the control system of M-inputs and N-outputs with an increased robust stability potential provides stability for any changes in uncertain parameters.

Keywords: control system, gradient-speed method, Lyapunov vector functions, with one input, with one output, robust stability, instability mode.

Теруге 11.12.2020 ж. жіберілді. Басуға 17.12.2020 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

3,99 Mb RAM

Шартты баспа табағы 26,6. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Шукурбаева

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3715

Сдано в набор 11.12.2020 г. Подписано в печать 17.12.2020 г.

Электронное издание

3,99 Mb RAM

Усл. печ. л. 26,6. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Шукурбаева

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 3715

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

8 (7182) 67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik.tou.edu.kz