УДК 681.5.013
https://doi.org/10.47533/2023.1606-146X.16

***М. А. БЕЙСЕНБИ*, А. ТЕМИРБЕК***

*Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан
beisenbi@mail.ru, aiku08@mail.ru*

# СИНТЕЗ НАСТРАИВАЕМОГО РЕГУЛЯТОРА ОСНОВНОГО КОНТУРА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ОДНИМ ВХОДОМ И ОДНИМ ВЫХОДОМ

*Предлагается для решения задачи синтеза настраиваемого регулятора основного контура адаптивной системы управления градиентно-скоростным методом вектор-функции Ляпунова. Представление эталонной модели и основного контура управления как градиентные системы, а функций Ляпунова как потенциальные функции позволяет применить градиентно-скоростной метод вектор-функции Ляпунова для исследования устойчивости, робастности и качества работы основного контура адаптивной системы управления. Апериодическая робастная устойчивость настраиваемого регулятора основного контура адаптивной системы управления гарантирует робастной устойчивости и качества системы управления.*

***Ключевые слова:*** *адаптивная система управления, градиентно-скоростной метод вектор-функции Ляпунова.*

**Введение**. Методы адаптивного управления [1,2,3,4,5,6] служат для построения систем управления при значительной неопределенности параметров объекта управления, особенно условий его функционирования (характеристик среды), имеющейся на стадии проектирования или в процессе эксплуатации системы. Рассматриваются такие задачи управления, при которых динамические свойства объекта могут изменяться в широких пределах неизвестным заранее образом. Имеющейся априорной информации недостаточно для построения систем управления с заданными показателями качества. В адаптивных системах управления недостаток априорной информации восполняются в процессе ее функционирования на основе текущих данных о поведении объекта. Эти данные обрабатываются в реальном масштабе времени (в темпе протекания управляемого процесса) и используются для повышения качества системы.

Процесс адаптивного управления можно рассматривать как процесс взаимодействия трех подсистем [1,2,3,6]: объекта, настраиваемого регулятора основного контура (собственно регулятора), блока адаптации (адаптера). Два последних блока объединяются в адаптивный регулятор, который имеет двухуровневую иерархическую структуру. Регулятор основного контура непосредственно формирует управляющее воздействие u(t), поступающее на регулирующий орган объекта управления. Закон (алгоритм) управления в основном контуре зависит от некоторого набора настраиваемых параметров *K*. Настройка этих параметров производится на втором уровне, в соответствии с некоторым законом, называемым алгоритмом адаптации на основе доступной текущей информации. Задача алгоритма адаптации состоит в настрой-

* E-mail корреспондирующего автора: beisenbi@mail.ru

ке коэффициентов регулятора таким образом, чтобы свести рассогласование между объектом управления и эталонной моделью к нулю. Это может быть достигнуто при асимптотической робастной устойчивости системы с требуемой динамикой. При этом основной проблемой исследования является отсутствие универсальных методов построения функций Ляпунова [1,3,4] для исследования адаптивных систем управления. В настоящее время этот метод является в основном инструментом для теоретических исследований и не может дать ответы на все вопросы касающиеся устойчивости и качества работы адаптивных регуляторов в реальных условиях. Поэтому предлагается для исследования адаптивных систем управления новый градиентно-скоростной метод вектор функции Ляпунова [7,8,9,10,11,12], где система управления рассматривается как градиентные системы и функция Ляпунова, как потенциальные функций из теории катастроф [13,14]. Условия градиентности позволяют однозначно построить функцию Ляпунова, и условие существования функции Ляпунова соответствует условию асимптотической робастной устойчивости системы управления с требуемой динамикой [9,10,11]. Это также обеспечивает достижение основной цели управления.

Статья посвящена решению задачи синтеза настраиваемого регулятора основного контура адаптивной системы управления градиентно-скоростным методом вектор функции Ляпунова.

**Материалы и методы.** Рассмотрим линейную стационарную систему управления. Систему исследуем на апериодической робастной устойчивости градиентно-скоростным методом вектор-функций Ляпунова [7,9,10]:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \qquad y(t) = x(t), \tag{1}$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния объекта управления; $x(t) \in R^m$ – вектор управления, $A \in R^{n\times n}$ – матрица объекта управления.

Закон управления задан в виде

$$u(t) = -Kx(t), \tag{2}$$

где $K$ – подлежащая определению $n \times 1$ – матрица коэффициентов регулятора. Замкнутая система объект-регулятор описывается уравнением

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t), \tag{3}$$

где

$$A = \begin{Vmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & -a_1 \end{Vmatrix}, \quad B = \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b_n \end{Vmatrix}, \quad K = \|k_1,\ k_2,\ \dots, k_n\|$$

Как легко убедиться непосредственно подстановкой, матрица $A - BK$ замкнутой системы (3) также имеет вид матрицы Фробениуса.

Качество и устойчивость системы управления определяются элементами матрицы замкнутой системы. Поэтому исследуем систему на апериодической робастной устойчивости, где переходные процессы происходят без всплеска в начальный период, и система работает без колебаний и без перерегулирования.

Систему (3) в развернутой форме представим в виде

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \quad\vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = -(a_n + b_n k_1)x_1 - (a_{n-1} + b_n k_2)x_2 - (a_{n-2} + b_n k_3)x_3 -, \dots \\ \qquad \cdots, -(a_1 + b_n k_n)x_n \end{cases} \tag{4}$$

Находим условие апериодической робастной устойчивости системы (4) градиентно-скоростным методом вектор-функции Ляпунова.

Из уравнения состояния (4) находим компонентов вектора градиента от вектор-функции Ляпунова $V(x) = \big(V_1(x), V_2(x), \dots, V_n(x)\big)$ [7,9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_1(x)}{\partial x_1} = 0, \ \frac{\partial V_1(x)}{\partial x_2} = -x_2, \ \frac{\partial V_1(x)}{\partial x_3} = 0, \dots, \frac{\partial V_1(x)}{\partial x_n} = 0 \\ \frac{\partial V_2(x)}{\partial x_1} = 0, \ \frac{\partial V_2(x)}{\partial x_2} = 0, \ \frac{\partial V_2(x)}{\partial x_3} = -x_3, \dots, \frac{\partial V_2(x)}{\partial x_n} = 0 \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \frac{\partial V_{n-1}(x)}{\partial x_1} = 0, \ \frac{\partial V_{n-1}(x)}{\partial x_2} = 0, \ \frac{\partial V_{n-1}(x)}{\partial x_3} = 0, \dots, \frac{\partial V_{n-1}(x)}{\partial x_n} = -x_n \\ \frac{\partial V_n(x)}{\partial x_1} = (a_n + b_n k_1)x_1, \ \frac{\partial V_n(x)}{\partial x_2} = (a_{n-1} + b_n k_2)x_2, \\ \frac{\partial V_n(x)}{\partial x_3} = (a_{n-2} + b_n k_3)x_3, \dots, \frac{\partial V_n(x)}{\partial x_n} = (a_1 + b_n k_n)x_n \end{cases} \tag{5}$$

Из (4) определяем компоненты разложения вектора скорости по координатам системы ($x_1$, ..., $x_n$) [7,9,10]:

$$\begin{cases} \left(\frac{dx_1}{dt}\right)_{x_1} = 0, \left(\frac{dx_1}{dt}\right)_{x_2} = x_2, \left(\frac{dx_1}{dt}\right)_{x_3} = 0, \dots, \left(\frac{dx_1}{dt}\right)_{x_n} = 0 \\ \left(\frac{dx_2}{dt}\right)_{x_1} = 0, \left(\frac{dx_2}{dt}\right)_{x_2} = 0, \left(\frac{dx_2}{dt}\right)_{x_3} = x_3, \dots, \left(\frac{dx_2}{dt}\right)_{x_n} = 0 \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \left(\frac{dx_{n-1}}{dt}\right)_{x_1} = 0, \left(\frac{dx_{n-1}}{dt}\right)_{x_2} = 0, \left(\frac{dx_{n-1}}{dt}\right)_{x_3} = 0, \dots, \left(\frac{dx_{n-1}}{dt}\right)_{x_n} = x_n \\ \left(\frac{dx_n}{dt}\right)_{x_1} = -(a_n + b_n k_1)x_1, \left(\frac{dx_n}{dt}\right)_{x_2} = -(a_{n-1} + b_n k_2)x_2, \\ \left(\frac{dx_n}{dt}\right)_{x_3} = -(a_{n-2} + b_n k_3)x_3, \dots, \left(\frac{dx_n}{dt}\right)_{x_n} = -(a_1 + b_n k_n)x_n \end{cases} \tag{6}$$

Градиентно-скоростной метод вектор-функции Ляпунова базируется на теореме об асимптотической устойчивости системы, согласно которой для асимптотической устойчивости состояния равновесия системы необходимо и достаточно, чтобы существовала положительно определенная функция $V(x)$, такая, чтобы полная производная по времени от функции Ляпунова с учетом уравнения состояния (4) являлась отрицательно определенной функцией [3,7]. Поэтому вычисляется полная производная от вектор-функции Ляпунова как скалярное произведение вектора градиента вектор-функции Ляпунова (5) на вектор скорости (6) [7]:

$$\frac{dV(x)}{dt} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{\partial V_i(x)}{\partial x_i}\left(\frac{dx_i}{dt}\right)_{x_k} = -x_2^2 - x_3^2 -, \cdots, -x_n^2 - (a_n + b_n k_1)^2 {x_1}^2 - \\ - (a_{n-1} + b_n k_2)^2 {x_2}^2 - (a_{n-2} + b_n k_3)^2 {x_3}^2, \cdots, -(a_1 + b_n k_n)^2 {x_n}^2, \tag{7}$$

Из (7) очевидно, что полная производная по времени от вектор-функции Ляпунова является знакоотрицательной функцией.

Функцию Ляпунова из (5) можем получить в виде

$$V(x) = \frac{1}{2}(a_n + b_n k_1){x_1}^2 + \frac{1}{2}(a_{n-1} + b_n k_2 - 1)x_2^2 + \frac{1}{2}(a_{n-2} + b_n k_3 - 1)x_3^2 + \\ +, \ldots, + \frac{1}{2}(a_1 + b_n k_n - 1)x_n^2, \tag{8}$$

Условие положительной определенности функции (8), т.е. условие существования функции Ляпунова определяется неравенствами:

$$\begin{cases} a_n + b_n k_1 > 0 \\ a_{n-1} + b_n k_2 - 1 > 0 \\ a_{n-2} + b_n k_3 - 1 > 0 \\ \cdots \ \cdots \ \cdots \\ a_1 + b_n k_n - 1 > 0 \end{cases} \tag{9}$$

Система неравенств (9) является условием апериодической робастной устойчивости системы управления с одним входом и с одним выходом – SISO системы.

Выбор эталонной модели зависит от требований, предъявляемых к замкнутой системе. При этом, предположим, что матрица $A_M$ – не только гурвицевой, но и требуемый, и был апериодической робастной устойчивой.

Рассмотрим задачу обеспечение объекта управления желаемой динамики (апериодической робастной устойчивости), которую зададим с помощью эталонной модели

$$\dot{x}_M = A_M x_M + B_M r(t), \tag{10}$$

где $x_M(t) \in R^n$ – вектор состояния эталонной модели; $r(t) \in R^m$ – задающее воздействие.

$$A_M = \begin{Vmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -d_n & -d_{n-1} & -d_{n-2} & \cdots & -d_1 \end{Vmatrix}, \quad B_M = \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b_{Mn} \end{Vmatrix}, \quad B_M = b_{Mn},$$

Эталонной моделью выберем апериодическую робастную устойчивую, которая показывает хорошие качества управления. Исследуем эталонную модель. Таким образом, систему (10) записываем в развернутой форме.

$$\begin{cases} \dot{x}_{M1} = x_{M2} \\ \dot{x}_{M2} = x_{M3} \\ \quad \vdots \\ \dot{x}_{M(n-1)} = x_{Mn} \\ \dot{x}_{Mn} = -d_n x_{M1} - d_{n-1} x_{M2} - d_{n-2} x_{M3} -, \cdots, -d_1 x_{Mn} + \\ \qquad +b_{Mn} r_1 + b_{Mn} r_2 + b_{Mn} r_3 +, \dots, +b_{Mn} r_m \end{cases} \tag{11}$$

Исследуем на апериодической робастной устойчивости системы (11) градиентно-скоростным методом вектор-функции Ляпунова.

Из уравнения (11) определяем компоненты вектора градиента от вектор-функции Ляпунова $V(x_M, r) = \big(V_1(x_M, r), V_{n-1}(x_M, r), \dots, V_n(x_M, r)\big)$:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial V_1(x_M,r)}{\partial x_{M1}} = 0, \quad \dfrac{\partial V_1(x_M,r)}{\partial x_{M2}} = -x_{M2}, \quad \dfrac{\partial V_1(x_M,r)}{\partial x_{M3}} = 0, \dots, \dfrac{\partial V_1(x_M,r)}{\partial x_{Mn}} = 0 \\ \dfrac{\partial V_2(x_M,r)}{\partial x_{M1}} = 0, \quad \dfrac{\partial V_2(x_M,r)}{\partial x_{M2}} = 0, \quad \dfrac{\partial V_2(x_M,r)}{\partial x_{M3}} = -x_{M3}, \dots, \dfrac{\partial V_2(x_M,r)}{\partial x_{Mn}} = 0 \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \dfrac{\partial V_{n-1}(x_M,r)}{\partial x_{M1}} = 0, \quad \dfrac{\partial V_{n-1}(x_M,r)}{\partial x_{M2}} = 0, \quad \dfrac{\partial V_{n-1}(x_M,r)}{\partial x_{M3}} = 0, \dots, \dfrac{\partial V_{n-1}(x_M,r)}{\partial x_{Mn}} = -x_{Mn} \\ \dfrac{\partial V_n(x_M,r)}{\partial x_{M1}} = d_n x_{M1}, \quad \dfrac{\partial V_n(x_M,r)}{\partial x_{M2}} = d_{n-1} x_{M2}, \quad \dfrac{\partial V_n(x_M,r)}{\partial x_{M3}} = d_{n-2} x_{M3}, \dots \\ \qquad \dots, \dfrac{\partial V_n(x_M,r)}{\partial x_{Mn}} = d_1 x_{Mn}; \\ \dfrac{\partial V_n(x_M,r)}{\partial r_1} = -b_{Mn} r_1, \quad \dfrac{\partial V_n(x_M,r)}{\partial r_2} = -b_{Mn} r, \quad \dfrac{\partial V_n(x_M,r)}{\partial r_3} = -b_{Mn} r_3, \dots \\ \qquad \dots, \dfrac{\partial V_n(x_M,r)}{\partial r_m} = -b_{Mn} r_m, \end{cases} \tag{12}$$

Из (11) определяем компоненты разложения вектора скорости по координатам системы $(x_{M1}, \cdots, x_{Mn}; r_1, \cdots, r_m)$:

$$
\begin{cases}
\left(\frac{dx_{M1}}{dt}\right)_{x_{M1}} = 0, \left(\frac{dx_{M1}}{dt}\right)_{x_{M2}} = x_{M2}, \left(\frac{dx_{M1}}{dt}\right)_{x_{M3}} = 0, \ldots, \left(\frac{dx_{M1}}{dt}\right)_{x_{Mn}} = 0; \\
\left(\frac{dx_{M2}}{dt}\right)_{x_{M1}} = 0, \left(\frac{dx_{M2}}{dt}\right)_{x_{M2}} = 0, \left(\frac{dx_{M2}}{dt}\right)_{x_{M3}} = x_{M3}, \ldots, \left(\frac{dx_{M2}}{dt}\right)_{x_{Mn}} = 0; \\
\ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \\
\left(\frac{dx_{M(n-1)}}{dt}\right)_{x_{M1}} = 0, \left(\frac{dx_{M(n-1)}}{dt}\right)_{x_{M2}} = 0, \left(\frac{dx_{M(n-1)}}{dt}\right)_{x_{M3}} = 0, \ldots \\
\ldots, \left(\frac{dx_{M(n-1)}}{dt}\right)_{x_{Mn}} = x_{Mn}; \\
\left(\frac{dx_{Mn}}{dt}\right)_{x_{M1}} = -d_n x_{M1}, \left(\frac{dx_{Mn}}{dt}\right)_{x_{M2}} = -d_{n-1} x_{M2}, \left(\frac{dx_{Mn}}{dt}\right)_{x_{M3}} = -d_{n-2} x_{M3}, \ldots \\
\ldots, \left(\frac{dx_{Mn}}{dt}\right)_{x_{Mn}} = -d_1 x_{Mn}; \\
\left(\frac{dx_{Mn}}{dt}\right)_{r_1} = b_{Mn} r_1, \left(\frac{dx_{Mn}}{dt}\right)_{r_2} = b_{Mn} r_2, \left(\frac{dx_{Mn}}{dt}\right)_{z_3} = b_{Mn} r_3, \ldots, \left(\frac{dx_{Mn}}{dt}\right)_{r_m} = b_{Mn} r_m.
\end{cases} \tag{13}
$$

Полная производная по времени от вектор-функции Ляпунова вычисляется как скалярное произведение вектора скорости (13) на вектор градиентов (12).

$$
\begin{gathered}
\frac{dV(x,r)}{dt} = -x_{M2}^2 - x_{M3}^2 -, \cdots, -x_{Mn}^2 - d_n^2 x_{M1}^2 - d_{n-1}^2 x_{M2}^2 - d_{n-2}^2 x_{M3}^2 -, \ldots \\
\ldots, - d_1^2 x_{Mn}^2 - b_{Mn}^2 r_1^2 - b_{Mn}^2 r_2^2 - b_{Mn}^2 r_3^2 -, \ldots, -b_{Mn}^2 r_m^2,
\end{gathered} \tag{14}
$$

Функция (14) является гарантированно знакоотрицательной функцией, т.е. достаточное условие асимптотической устойчивости выполняется.

Функцию Ляпунова из (12) можем получить в виде:

$$
\begin{gathered}
V(x) = \frac{1}{2} d_n x_{M1}^2 + \frac{1}{2}(d_{n-1} - 1) x_{M2}^2 + \frac{1}{2}(d_{n-2} - 1) x_{M3}^2 +, \ldots, + \frac{1}{2}(d_1 - 1) x_{Mn}^2 - \\
-\frac{1}{2} b_{Mn} r_1^2 - \frac{1}{2} b_{Mn} r_2^2 - \frac{1}{2} b_{Mn} r_3^2 -, \ldots, -\frac{1}{2} b_{Mn} r_m^2,
\end{gathered} \tag{15}
$$

Положительную определенность функций Ляпунова (15) можно представить в виде:

$$
\begin{cases}
d_n > 0 \quad \text{и} \quad -b_{Mn} r_1 > 0 \\
d_{n-1} - 1 > 0 \quad -b_{Mn} r_2 > 0 \\
d_{n-2} - 1 > 0 \quad -b_{Mn} r_3 > 0 \\
\ldots \; \ldots \; \ldots \\
d_1 - 1 > 0 \quad -b_{Mn} r_m > 0
\end{cases} \tag{16}
$$

**Результаты и обсуждение.** Таким образом, из (15) следует, что внешнее воздействие $r(t)$ должно быть ограниченным и при нарушений условии (16) эталонная модель теряет апериодическую робастную устойчивость.

В целом, для достижения цели при фиксированных значениях (параметров) системы должен выполняться, которую можно получить из (9) и (16)

$$\begin{cases} b_n k_1 x_1 + b_{Mn} r_1 = d_n - a_n \\ b_n k_2 x_2 + b_{Mn} r_2 = d_{n-1} - a_{n-1} \\ b_n k_3 x_3 + b_{Mn} r_3 = d_{n-2} - a_{n-2} \\ \dots \\ b_n k_n x_n + b_{Mn} r_n = d_1 - a_1 \end{cases} \qquad (17)$$

**Выводы.** Синтез адаптивных систем управления неразрывно связан с обеспечением устойчивости замкнутого объекта с контуром адаптации. Метод функции Ляпунова является одним из основных методов исследования устойчивости и качества движения линейных и нелинейных систем. Но в связи с отсутствием универсальных подходов к построению функций Ляпунова метод ограниченно применяется для исследования адаптивных систем управления. В настоящее время этот метод является в основном инструментом для теоретических исследований и не может дать ответы на все вопросы, касающиеся устойчивости и качества работы адаптивных регуляторов в реальных условиях.

Представление эталонной модели и основного контура управления как градиентной системы, а функции Ляпунова как потенциальной функции позволяет применить градиентно-скоростной метод вектор-функции Ляпунова для исследования устойчивости, робастности и качества работы основного контура адаптивной системы управления. Где из условий апериодической робастной устойчивости эталонной модели и основного контура адаптивной системы управления при фиксированных значениях параметров объекта управления вычисляются соответствующие коэффициенты обратной связи основного контура адаптивной системы управления. При этом коэффициенты обратной связи основного контура адаптивной системы управления можно определить по комплексу показателей качества, таких как устойчивость, робастность, колебательность, быстродействие, отсутствие перерегулирования, статическая точность, желаемый вид переходных процессов в системе и т.д.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт. Т.5: Методы современной теории автоматического управления/ под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784с.

2 Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Крутова И.Н., Земляков С.Д. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 260с.

3 Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления. Гл.13, Управление нелинейными колебательными и хаотическими системами. Спб.: Наука, 1999.

4 Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. – М.: Наука, 1990. – 292с.

5 Nazenda K.S., Volavani L.S. A comparison of Lyapunov and hyperstability approaches to adaptive control of continuous systems // IEEE Trans. Automot. Confr. – 1980. – Vol. AC-25. – №2. – p.243-247.

6 Козлов Ю.М., Юсупов Р.М. Беспоисковые самонастраивающиеся системы. – М.: Наука, 1969-456с.

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

8 Beisenbi, M.A., Basheyeva, Zh.O. Solving output control problems using Lyapunov gradient-velocity vector function. International Journal of Electrical and Computer Engineering, Volume 9, Issue 4, 2019, Pages 2874-2879.

9 Beisenbi, M., Kaliyeva, S. The solution to the problem of synthesis of control of multidimensional objects. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019 November 2019, Номер статьи 90120642019 International Conference on Information Science and Communications Technologies, ICISCT 2019; Tashkent; Uzbekistan; 4 November 2019 до 6 November 2019

10 Beisenbi, M., Sagymbay, A., Satybaldina, D., Kissikova, N. Velocity gradient method of Lyapunov vector functions. ACM International Conference Proceeding Series 10 January 2019, Pages 88-925th International Conference on e-Society, e-Learning and e-Technologies, ICSLT 2019; Vienna; Austria.

11 Beisenbi, M., Kaliyeva, S. Synthesis of the control systems by the state of an object with input and single output by a gradientvelocity method of A.M. Lyapunov vector functions. International Journal of Civil Engineering and Technology Volume 9, Issue 10, October 2018, Pages 2080-2086.

12 Mamyrbek, B., Aliya, S., Gulzhan, U., Janar, Y. Robust stability of spacecraft traffic control system using lyapunov functions. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. Volume 88, Issue 2, 20 June 2016, Pages 252-261.

13 Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. В 2-томах. Т.1. – М.: Мир, 1984.

14 Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. – М.:Наука, 2001.

**REFERENCES**

1 Metody klassicheskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija: Uchebnik v 5-i tt. T5: Metody sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija/ pod red. K.A. Pupkova, N.D. Egupova [Methods of classical and modern theory of automatic control: Textbook in 5 vols. vol.5: Methods of modern theory of automatic control]. – M.: izd-vo MGTU im. N.`E. Baumana, 2004. -784p.

2 Petrov B.N., Rutkovskij V.Ju., Krutova I.N., Zemljakov S.D. Printsipy postroenija i proektirovanija samonastraivajuschihsja sistem upravlenija [Principles of construction and design of self-adjusting control systems]. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 260p.

3 Andrievskij B.R., Fradkov A.L. Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravlenija. Gl.13, Upravlenie nelinejnymi kolebatel’nymi i haoticheskimi sistemami [Selected chapters of automatic control theory. Chapter.13, Control with nonlinear oscillatory and chaotic systems]. Spb.: Nauka, 1999.

4 A.L. Fradkov Adaptive control in complex systems [Adaptive control in complex system]. - M.: Science, 1990. — 292pp.

5 Nazenda K.S., Volavani L.S. A comparison of Lyapunov and hyperstability approaches to adaptive control of continuous systems // IEEE Trans. Automot. Confr. – 1980. – Vol. AC-25.-№2.- p.243-247.

6 Kozlov Ju.M., Jusupov R.M. Bespoiskovye samonastraivajuschiesja sistemy [Searchless self-tuning systems]. – M.: Nauka, 1969-456p.

7 Bejsenbi M.A. Issledovanie robastnoj ustojchivosti sistem avtomaticheskogo upravlenija metodom funktsii A.M. Ljapunova [Investigation of the robust stability of automatic control system by the function method A.M. Lyapunov]. – Astana, 2015-204р.

8 Beisenbi, M.A., Basheyeva, Zh.O. Solving output control problems using Lyapunov gradient-velocity vector function. International Journal of Electrical and Computer Engineering, Volume 9, Issue 4, 2019, Pages 2874-2879.

9 Beisenbi, M., Kaliyeva**, S.** The solution to the problem of synthesis of control of multidimensional objects. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019 November 2019, Номер статьи 90120642019 International Conference on Information Science and Communications Technologies, ICISCT 2019; Tashkent; Uzbekistan; 4 November 2019 до 6 November 2019

10 Beisenbi, M., Sagymbay, A., Satybaldina, D., Kissikova, N. Velocity gradient method of Lyapunov vector functions. ACM International Conference Proceeding Series 10 January 2019, Pages 88-925th International Conference on e-Society, e-Learning and e-Technologies, ICSLT 2019; Vienna; Austria.

11 Beisenbi, M., Kaliyeva, S. Synthesis of the control systems by the state of an object with input and single output by a gradientvelocity method of A.M. Lyapunov vector functions. International Journal of Civil Engineering and Technology Volume 9, Issue 10, October 2018, Pages 2080-2086.

12 Mamyrbek, B., Aliya, S., Gulzhan, U., Janar, Y. Robust stability of spacecraft traffic control system using lyapunov functions. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. Volume 88, Issue 2, 20 June 2016, Pages 252-261.

13 Gilmor R. Prikladnaja teorija katastrof. V 2-tomah. T.1 [Applied Catastrophe Theory, in 2 vol. vol. 1]. -M.: Mir, 1984.

14 Poston T., Stjuart I. Teorija katastrof i ee prilozhenija [The theory of catastrophes and its applications]. – M.: Nauka, 2001.

***М. А. БЕЙСЕНБІ, А. ТЕМИРБЕК***

*Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,*
*Астана, Қазақстан*
*beisenbi@mail.ru, aiku08@mail.ru*

## БІР КІРІСІ ЖӘНЕ БІР ШЫҒЫСЫ БАР АДАПТИВТІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ НЕГІЗГІ КОНТУРЫНЫҢ БАПТАЛАТЫН РЕГУЛЯТОРЫНЫҢ СИНТЕЗІ

*Ляпуновтың градиенті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен адаптивті басқару жүйесінің негізгі контурының бапталатын регуляторын синтездеу мәселесін шешу ұсынылады. Эталондық модель мен басқарудың негізгі контурын градиенттік жүйелер ретінде, ал Ляпунов функцияларын потенциалды функциялар ретінде көрсету адаптивті басқару жүйесінің негізгі контурының орнықтылығын, робастылық және сапасын зерттеу үшін Ляпуновтың градиенті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілін қолдануға мүмкіндік береді. Адаптивті басқару жүйесінің негізгі контурының бапталатын регуляторының апериодтық, робастық орнықтылығы басқару жүйесінің робасты орнықтылығы мен сапасына кепілдік береді.*

***Түйін сөздер****: адаптивті басқару жүйесі, Ляпуновтың градиенті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілі.*

***M. A. BEISENBI, A. TEMIRBEK***

*L.N. Gumilyov Eurasian National University,*
*Astana, Kazakhstan*
*beisenbi@mail.ru, aiku08@mail.ru*

## SYNTHESIS OF A CONFIGURABLE CONTROLLER OF THE MAIN CIRCUIT OF AN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM WITH ONE INPUT AND ONE OUTPUT

*It is proposed to solve the problem of synthesis of a tunable controller of the main contour of an adaptive control system, using the gradient-velocity method of the Lyapunov vector function. The representation of the reference model and the main control loop as gradient systems, and the Lyapunov functions as potential functions allows us to apply the gradient-velocity method of the Lyapunov vector function to study the stability, robustness and quality of the main loop of an adaptive control system. The aperiodic robust stability of the adjustable controller of the main circuit of the adaptive control system guarantees the robust stability and quality of the control system.*

***Key words:*** *adaptive control system, gradient-velocity method of the Lyapunov vector -valued function*