ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Մեխանիկա XXXVIII, № 6, 1985 Механика

УДК 531.38

ОПТИМАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРИ ПОМОЩИ МАХОВИКОВ

СААКЯН Л. С.

На основании теоремы Н. Н. Красовского [1] решается задача об оптимальной стабилизации положения равновесия твердого тела при помощи маховиков. Полученный закон управления представляет собой линейную функцию скоростей и координат тела. Выясняется, что при найденном законе управления остальные положения равновесия тела являются неустойчивыми.

§ 1. Рассмотрим твердое тело с неподвижной точкой в центре масс o, по главным осям инерции которого расположены оси трех однородных симметричных маховиков. Маховики приводятся во вращение специальными двигателями. Других внешних сил, действующих на тело, нет.

Введем следующие обозначения: $oX_1X_2X_3$—неподвижная система координат; $ox_1x_2x_3$—подвижная система осей координат, жестко связанная с телом и совмещенная с его главными осями инерции; p_i —проекции абсолютной мгновенной угловой скорости вращения тела на оси x_1, x_2, x_3; C_i —моменты инерции системы относительно осей x_1, x_2, x_3; T_i—осевые моменты инерции маховиков, ω_i—относительные угловые скорости вращения маховиков ($i=1, 2, 3$).

Уравнения движения системы запишем в форме трех динамических уравнений Эйлера

$$C_1\dot{p}_1+T_1\dot{\omega}_1+(C_3-C_2)p_2p_3+p_2H_3-p_3H_2=0, \quad (1\ 2\ 3); \quad H_i=T_i\omega_i, \ (i=1, 2, 3) \tag{1.1}$$

Уравнения, описывающие вращательное движение маховиков, без учета внутреннего трения в осях имеют вид

$$T_i(\dot{\omega}_i+\dot{p}_i)=-u_i \quad (i=1, 2, 3) \tag{1.2}$$

где $-u_i$—управляющие моменты, создаваемые двигателями. Направляющие косинусы между осями $oX_1X_2X_3$ и $ox_1x_2x_3$ зададим в виде таблицы (см. табл. 1) и к уравнениям (1.1) присоединим девять кинематических уравнений Пуассона

$$\dot{\alpha}_{i1}=\alpha_{i2}p_3-\alpha_{i3}p_2 \quad (1\ 2\ 3); \quad (i=1, 2, 3) \tag{1.3}$$

имея ввиду, что переменные α_{ik} ($i, k=1, 2, 3$) связаны шестью геометрическими соотношениями

Таблица 1

	x_1	x_2	x_3
X_1	α_{11}	α_{12}	α_{13}
X_2	α_{21}	α_{22}	α_{23}
X_3	α_{31}	α_{32}	α_{33}

$$\sum_{l=1}^{3} \alpha_{ki}\alpha_{li} = \begin{cases} 1, & k=l \\ 0, & k\neq l \end{cases} \quad (k,\ l=1,\ 2,\ 3) \tag{1.4}$$

Уравнения (1.1)—(1.3) при выключенном управлении ($u_i=0$, $i=1$, 2, 3) допускают следующее частное решение:

$$p_i=0, \quad \alpha_{ik}=\begin{cases} 1, & i=k \\ 0, & i\neq k \end{cases} \ (i,\ k=1,\ 2,\ 3), \quad \omega_i=\omega_i^0=\text{const} \tag{1.5}$$

принадлежащее семейству решений $p_i=0$, $\alpha_{ik}=\alpha_{ik}^0$, где α_{ik}^0 удовлетворяют соотношению (1.4), описывающему равновесие тела и равномерные вращения маховиков.

Рассмотрим задачу оптимальной стабилизации положения равновесия (1.5), которая состоит в следующем: требуется так подобрать u_i, как функции переменных p_i, α_{ik}, чтобы при достаточно малых начальных возмущениях тело асимптотически приближалось к исходному положению

$$p_i=0, \quad \alpha_{ik}=\begin{cases} 1, & i=k \\ 0, & i\neq k \end{cases} \quad (i,\ k=1,\ 2,\ 3) \tag{1.6}$$

и, кроме того, обеспечивался минимум некоторого функционала, интегральным образом, характеризующего качество переходного процесса. При этом угловые скорости ω_i маховиков могут и не достигать своих исходных значений ω_i^0. Поскольку в данной задаче имеет место закон сохранения вектора-момента количества движения системы относительно точки o, то есть $G=\text{const}$, то, следуя [2], можно угловые скорости ω_i вращения маховиков исключить из уравнений движения, используя проекции вектора G на оси $oX_1X_2X_3$

$$\sum_{i=1}^{3} (C_ip_i+H_i)\alpha_{ki}=h_k^0=\text{const}, \ h_k^0=T_k\omega_k^0, \quad (k=1,\ 2,\ 3) \tag{1.7}$$

Так как $\det\|\alpha_{ki}\|_{k,i=1}^3=1$, то из (1.7) находим

$$C_ip_i+H_i=h_1^0\alpha_{1i}+h_2^0\alpha_{2i}+h_3^0\alpha_{3i}, \quad (i=1,\ 2,\ 3) \tag{1.8}$$

Теперь уравнения (1.1) с учетом (1.2), (1.8) принимают вид

$$(C_1-T_1)\dot{p}_1=(h_1^0\alpha_{12}+h_2^0\alpha_{22}+h_3^0\alpha_{32})p_3-(h_1^0\alpha_{13}+h_2^0\alpha_{23}+h_3^0\alpha_{33})p_2+u_1, \quad (1,\ 2,\ 3) \tag{1.9}$$

Угловые скорости ω_i маховиков в полученные уравнения (1.9) явно не входят, и, следовательно, можно решить обычную задачу об оптимальной стабилизации положения равновесия (1.6).

Составим уравнения возмущенного движения, приняв для вариаций переменных следующие обозначения:

$$p_i=p_i, \ \delta_{ii}=\alpha_{ii}-1, \quad \alpha_{ik}=\alpha_{ik}, \quad (i\neq k;\ i,\ k=1,\ 2,\ 3)$$

$$(C_1-T_1)\dot{p}_1=(h_1\alpha_{12}+h_2\delta_{22}+h_3\alpha_{32})p_3-(h_1\alpha_{13}+h_2\alpha_{23}+h_3\delta_{33})p_2+$$
$$+h_2p_3-h_3p_2+u_1, \quad (1,\ 2,\ 3) \tag{1.10}$$

$$\dot{\delta}_{11}=\alpha_{12}p_3-\alpha_{13}p_2,\quad \dot{\alpha}_{21}=\delta_{22}p_3-\alpha_{23}p_2+p_3,\quad \dot{\alpha}_{31}=\alpha_{32}p_3-\delta_{33}p_2-p_2,\quad (1,\ 2,\ 3) \tag{1.11}$$

где через h_i обозначены возмущения постоянных кинетического момента (1.7).

§ 2. Пусть на движениях системы (1.10), (1.11) требуется минимизировать следующий функционал:

$$T=\int_0 \Big[C_1p_1^2+C_2p_2^2+C_3p_3^2+\frac{1}{4C_1}(n_3\alpha_{32}-n_2\alpha_{23}+u_1)^2+$$

$$+\frac{1}{4C_2}(n_1\alpha_{13}-n_3\alpha_{31}+u_2)^2+\frac{1}{4C_3}(n_2\alpha_{21}-n_1\alpha_{12}+u_3)^2\Big]dt \tag{2.1}$$

который, очевидно, удовлетворительно обеспечивает затухание возмущенного движения и оценивает ресурсы, затрачиваемые на формирование управляющих воздействий u_i ($i=1,\ 2,\ 3$). В выражении (2.1) $n_i=\mathrm{const}>0$ ($i=1,\ 2,\ 3$) будут определены далее.

Рассмотрим определенно-положительную функцию

$$2V=\sum_{i=1}^{3}(C_i-T_i)p_i^2+n_1(\delta_{11}^2+\alpha_{12}^2+\alpha_{13}^2)+n_2(\alpha_{21}^2+\delta_{22}^2+\alpha_{23}^2)+n_3(\alpha_{31}^2+\alpha_{32}^2+\delta_{33}^2) \tag{2.2}$$

Для определения стабилизирующих воздействий u_i ($i=1,\ 2,\ 3$) составим выражение [1]

$$B[V;\ p_1,p_2,p_3;\ \delta_{11},\alpha_{12},\ldots,\delta_{33};\ u_1,u_2,u_3]=-\Big[p_1(n_2\alpha_{23}-n_3\alpha_{32})+$$

$$+p_2(n_3\alpha_{31}-n_1\alpha_{13})+p_3(n_1\alpha_{12}-n_2\alpha_{21})-\sum_{i=1}^{3}p_iu_i\Big]+C_1p_1^2+C_2p_2^2+C_3p_3^2+ \tag{2.3}$$

$$+\frac{1}{4C_1}(n_3\alpha_{32}-n_2\alpha_{23}+u_1)^2+\frac{1}{4C_2}(n_1\alpha_{13}-n_3\alpha_{31}+u_2)^2+\frac{1}{4C_3}(n_2\alpha_{21}-n_1\alpha_{12}+u_3)^2\geqslant 0$$

которое, согласно условиям теоремы об оптимальной стабилизации, при $u_i=u_i^0$ достигает минимума, равного нулю.

Оптимальные управляющие воздействия имеют вид:

$$u_1^0=-2C_1p_1+n_2\alpha_{23}-n_3\alpha_{32},\quad u_2^0=-2C_2p_2+n_3\alpha_{31}-n_1\alpha_{13}$$

$$u_3^0=-2C_3p_3+n_1\alpha_{12}-n_2\alpha_{21} \tag{2.4}$$

Поскольку подынтегральное выражение в (2.1) является лишь знакопостоянной формой, то для установления факта асимптотической устойчивости невозмущенного движения (1.6) воспользуемся теоремой Барбашина и Красовского [3].

Производная функции (2.2) по времени, составленная в силу уравнений возмущенного движения (1.10), (1.11), с учетом (2.4) имеет вид

$$\dot{V}=-2(C_1p_1^2+C_2p_2^2+C_3p_3^2) \tag{2.5}$$

то есть является знакопостоянной отрицательной функцией от вариаций переменных системы, а многообразие N точек, где $\dot V=0$, имеет вид

$$p_1=p_2=p_3=0,\ \delta_{ii},\ \alpha_{ij} \text{ — произвольны.} \tag{2.6}$$

Покажем, что в некоторой окрестности невозмущенного движения

$$p_i=0,\quad \delta_{ii}=0,\quad \alpha_{ij}=0,\quad (i\neq j;\ i,j=1,2,3) \tag{2.7}$$

многообразие (2.6), при соответствующем выборе величин n_i в (2.4), не содержит других целых движений системы, кроме (2.7). При значениях $p_1=p_2=p_3=0$ уравнения движения (1.10), (2.4), (1.11) принимают вид

$$n_2\alpha_{23}=n_3\alpha_{32},\ n_3\alpha_{31}=n_1\alpha_{13},\ n_1\alpha_{12}=n_2\alpha_{21},\ \dot\delta_{ii}=0,\ \dot\alpha_{ij}=0,\ (i\neq j;\ i,j=1,2,3) \tag{2.8}$$

Соотношения (1.4) с учетом (2.8), записанные в вариациях переменных, имеют следующий вид:

$$\begin{gathered}
\delta_{11}^2+\alpha_{12}^2+\alpha_{13}^2+2\delta_{11}=0,\quad \alpha_{12}(1+k_1+\delta_{22}+k_1\delta_{11})+\alpha_{13}\alpha_{23}=0\\
k_1^2\alpha_{12}^2+\delta_{22}^2+\alpha_{23}^2+2\delta_{22}=0,\quad \alpha_{13}(1+k_2+\delta_{33}+k_2\delta_{11})+k_3\alpha_{12}\alpha_{23}=0\\
k_2^2\alpha_{13}^2+k_3^2\alpha_{23}^2+\delta_{33}^2+2\delta_{33}=0,\quad \alpha_{23}(1+k_3+\delta_{33}+k_3\delta_{22})+k_1k_2\alpha_{12}\alpha_{13}=0
\end{gathered} \tag{2.9}$$

где обозначено: $k_1=\dfrac{n_1}{n_2},\ k_2=\dfrac{n_1}{n_3},\ k_3=\dfrac{n_2}{n_3},\ k_2=k_1k_3.$

Поскольку каждый элемент матрицы направляющих косинусов равен своему алгебраическому дополнению, то, поступая аналогично, как и выше, для величин $\alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{23}$ будем иметь следующие соотношения:

$$\begin{gathered}
\alpha_{12}(1+k_1+k_1\delta_{33})=k_2\alpha_{13}\alpha_{23},\quad \alpha_{13}(1+k_2+k_2\delta_{22})=k_2\alpha_{12}\alpha_{23}\\
\alpha_{23}(k_1+k_2+k_2\delta_{11})=k_1k_2\alpha_{12}\alpha_{13}
\end{gathered} \tag{2.10}$$

Подставив выражения (2.10) во вторую группу уравнений (2.9), получим

$$\begin{gathered}
\alpha_{12}(k_1k_2\delta_{11}+k_2\delta_{22}+k_1\delta_{33}+k_1k_2+k_1+k_2+1)=0\\
\alpha_{13}(k_1k_2\delta_{11}+k_2\delta_{22}+k_1\delta_{33}+k_1k_2+k_1+k_2+1)=0\\
\alpha_{23}(k_1k_2\delta_{11}+k_2\delta_{22}+k_1\delta_{33}+k_1k_2+k_1^2+k_2+k_1)=0
\end{gathered} \tag{2.11}$$

Величины $k_1>0$, $k_2>0$ можно выбрать так, чтобы первые два уравнения системы (2.11) имели место только при $\alpha_{12}=\alpha_{13}=0$. Действительно, рассмотрим соотношение

$$k_1k_2\delta_{11}+k_2\delta_{22}+k_1\delta_{33}+k_1k_2+k_1+k_2+1=0 \tag{2.12}$$

Уравнение (2.12) в пространстве переменных δ_{ii} $(i=1,2,3)$ определяет плоскость, которая отстоит от начала координат на расстоянии

$$h=\frac{(1+k_1)(1+k_2)}{\sqrt{k_1^2+k_2^2+k_1^2k_2^2}} \tag{2.13}$$

Из (2.13) имеем уравнение

$$[(1+k_1)^2-h^2(1+k_1^2)]k_2^2+2(1+k_1)^2k_2+(1+k_1)^2-h^2k_1^2=0$$

из которого получим

$$k_2=\frac{-(1+k_1)^2\pm\sqrt{h^2k_1^2(1+k_1^2)\left[\frac{(1+k_1)^2}{k_1^2}+\frac{(1+k_1)^2}{1+k_1^2}-h^2\right]}}{(1+k_1)^2-h^2(1+k_1^2)} \quad (2.14)$$

Так как вариации δ_{ii} $(i=1,2,3)$ меняются в пределах $-2\leqslant\delta_{ii}\leqslant0$, то при $h^2>12$ плоскость (2.12) с кубом $-2\leqslant\delta_{ii}\leqslant0$ общих точек иметь не будет (12—квадрат расстояния от вершины $\delta_{ii}=-2$ $(i=1,2,3)$ куба до начала координат).

Следовательно, если k_1 определить из условия

$$\frac{(1+k_1)^2}{k_1^2}+\frac{(1+k_1)^2}{1+k_1^2}=h^2>12, \quad (0<k_1<1) \quad (2.15)$$

а k_2 из условия (2.14), с учетом (2.15), то есть

$$k_2=-\frac{(1+k_1)^2}{(1+k_1)^2-h^2(1+k_1^2)}>0 \quad (2.16)$$

то первые два уравнения (2.11) имеют место только при $\alpha_{12}=\alpha_{13}=0$. Первое уравнение (2.9) при этом примет вид $\delta_{11}^2+2\delta_{11}=0$, то есть $\delta_{11}=0$, либо $\delta_{11}=-2$.

Из третьего соотношения (2.10) получим

$$\alpha_{23}(k_1+k_2+k_2\delta_{11})=k_1k_2\alpha_{12}\alpha_{13}=0,$$

то есть $\alpha_{23}=0$, так как $\delta_{11}=0$, либо $\delta_{11}=-2$, а $k_1\neq k_2$. Тогда из первой группы уравнений (2.9) следуют равенства

$$\delta_{22}^2+2\delta_{22}=0, \quad \text{то есть} \quad \delta_{22}=0, \quad \text{либо} \quad \delta_{22}=-2$$

$$\delta_{33}^2+2\delta_{33}=0, \quad \text{то есть} \quad \delta_{33}=0, \quad \text{либо} \quad \delta_{33}=-2$$

Таким образом, если начальные возмущения принадлежат области $\delta_{10}^2+\delta_{20}^2+\delta_{30}^2<4$, то многообразие N точек, где $\dot V=0$, при условиях (2.15), (2.16) не содержит других целых движений системы, кроме движения (2.7). Следовательно, невозмущенное движение (2.7) асимптотически устойчиво по Ляпунову [3] по отношению к (p_i), δ_{ii}, α_{ij}. Аналогично, как в [4], можно показать, что при наличии управляющих воздействий (2.4), за все время движения системы (1.10), (1.11), либо $\omega=0$, либо $\omega\to0$ при $t\to+\infty$, ω—вектор мгновенной угловой скорости тела.

Найденным движениям системы, кроме (2.7), соответствуют положения равновесия тела, при которых

$$p_i=0, \quad \alpha_{ik}=\begin{cases}\pm1, & i=k\\ 0, & i\neq k\end{cases} \quad (i,k=1,2,3) \quad (2.17)$$

Покажем, что все положения равновесия тела (2.17), кроме (1.6), при управлении (2.4) неустойчивы по Ляпунову.

Рассмотрим, например, положение равновесия

$$p_i=0,\quad \alpha_{11}=-1,\quad \alpha_{22}=1,\quad \alpha_{33}=-1,\quad \alpha_{ik}=0,\quad (i\neq k;\ i,k=1,2,3)$$

Составим уравнения возмущенного движения, сохраняя за вариациями переменных принятые обозначения. Имеем

$$\begin{gathered}(C_1-T_1)\dot{p}_1=(h_1\alpha_{12}+h_2\alpha_{22}+h_3\alpha_{32})p_3-(h_1\alpha_{13}+h_2\alpha_{23}+h_3\alpha_{33})p_2+\\ +h_2p_3-h_3p_2-2C_1p_1+n_2\alpha_{23}-n_3\alpha_{32},\quad (1\ 2\ 3)\end{gathered} \tag{2.18}$$

$$\begin{gathered}\dot{\alpha}_{11}=\alpha_{12}p_3-\alpha_{13}p_2,\ \dot{\alpha}_{21}=\alpha_{22}p_3-\alpha_{23}p_2+p_3,\\ \dot{\alpha}_{31}=\alpha_{32}p_3-\alpha_{33}p_2+p_2\end{gathered}\qquad (1\ 2\ 3)$$

Рассмотрим функцию

$$2V_1=\sum_{i=1}^{3}(C_i-T_i)p_i^2-n_1(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{r}_1)^2+n_2(\boldsymbol{\alpha}_2-\boldsymbol{r}_2)^2-n_3(\boldsymbol{\alpha}_3+\boldsymbol{r}_3)^2 \tag{2.19}$$

где $\boldsymbol{\alpha}_i^T=(\alpha_{i1},\alpha_{i2},\alpha_{i3})$, $(i=1, 2, 3)$, а $\boldsymbol{r}_i$ — единичные орты подвижных осей ox_i $(i=1, 2, 3)$.

Производная по времени от функции (2.19), составленная в силу уравнений возмущенного движения (2.18), равна

$$\dot{V}_1=-2(C_1p_1^2+C_2p_2^2+C_3p_3^2)$$

Возьмем последовательность начальных данных $\boldsymbol{\omega}_k\to 0$, $\boldsymbol{\alpha}_{1k}\to-\boldsymbol{r}_1$, $\boldsymbol{\alpha}_{2k}\to\boldsymbol{r}_2$, $\boldsymbol{\alpha}_{3k}\to-\boldsymbol{r}_3$ так, чтобы было $V_1<0$ при $t=t_0>0$. Так как функция V_1 не возрастает, то при $t\geqslant t_0$ будет $V_1\leqslant V_{10}$, где V_{10} — значение функции V_1 при $t=t_0$. С другой стороны, $\boldsymbol{\omega}_1^2\to 0$ при $t\to\infty$ на любом движении системы (1.10), (1.11), (2.4) и тело стремится к одному из положений равновесия (2.17) или (1.6), то есть $\boldsymbol{\alpha}_i\times\boldsymbol{r}_i\to 0$ при $t\to+\infty$, $(i=1, 2, 3)$.

Если $\boldsymbol{\alpha}_1\to-\boldsymbol{r}_1$, $\boldsymbol{\alpha}_2\to\boldsymbol{r}_2$, $\boldsymbol{\alpha}_3\to-\boldsymbol{r}_3$ при $t\to+\infty$, то из (2.19) следовало бы $V_1\to 0$. Но из неравенства $V_1\leqslant V_{10}<0$ вытекает, что во все время движения $n_1(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{r}_1)^2+n_3(\boldsymbol{\alpha}_3+\boldsymbol{r}_3)^2>k>0$, то есть не стремится к нулю при $t\to+\infty$.

Это означает, что интегральные кривые, начинающиеся в сколь угодно малой окрестности выбранного положения равновесия, покидают некоторую фиксированную окрестность при возрастании времени, что свидетельствует о неустойчивости по Ляпунову.

Аналогичным путем факт неустойчивости можно установить и для остальных положений равновесия (2.17).

Таким образом, установлено следующее утверждение.

При управляющих воздействиях (2.4), приложенных к маховикам, где $n_i>0$ $(i=1, 2, 3)$ связаны соотношениями

$$n_1=n_2k_1,\quad n_2=n_3k_3,\quad k_2=k_1k_3$$

а величины k_1, k_2 определяются из условий (2.15) (2.16), любое движение твердого тела либо является состоянием покоя, либо стремится к такому состоянию, причем положение равновесия (1.6) асимптотически устойчиво по Ляпунову по отношению к перемейным p_i, $\alpha_{ii}-1$, α_{ij}, а любое другое положение равновесия (2.17), отличное от (1.6), обязательно будет неустойчивым. При этом, управляющие воздействия (2.4) минимизируют функционал (2.1).

Найденное управление (2.4) с точностью до постоянных множителей, совпадает с линейной частью управления, полученного в [2].

ՊԻՆԴ ՄԱՐՄՆԻ ՀԱՎԱՍԱՐԱԿՇՌՈՒԹՅԱՆ ԴԻՐՔԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ՍՏԱԲԻԼԻԶԱՑԻԱՆ ԹԱՓԱՆԻՎՆԵՐԻ ՄԻՋՈՑՈՎ

Լ. Ս. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

Ամփոփում

Ն. Ն. Կրասովսկու թեորեմի հիման վրա լուծվում է պինդ մարմնի հավասարակշռության դիրքի օպտիմալ ստաբիլիզացիայի խնդիրը թափանիվների միջոցով։ Ստացված ղեկավարման օրենքը իրենից ներկայացնում է մարմնի արագության և կոորդինատների գծային ֆունկցիա։ Պարզվում է, որ գտած ղեկավարման օրենքի դեպքում մարմնի մնացած հավասարակշռության դիրքերը անկայուն են։

OPTIMUM STABILIZATION OF THE POSITION OF EQUILIBRIUM OF THE SOLID SUBSTANCE WITH THE HELP OF HANDWHEELS

L. S. SAHAKIAN

Summary

On the basis of Crasovsky's theorem [1] the problem of optimum stabilization of the position of equilibrium of the solid substance with the help of handwheels is solved.

The obtained law of control is a linear function of velocities and coordinates of the substance. As it turns out, by means of the obtained law of control, the rest of the positions of equilibrium of the substance are unstable.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Красовский Н. Н.* Проблемы стабилизации управляемых движений. В кн.: Теории устойчивости движения. Доп. 4. М.: Наука, 1966.
2. *Крементуло В. В.* Стабилизация стационарных движений твердого тела. М.: Наука, 1977.
3. *Барбашин Е. А., Красовский Н. Н.* Об устойчивости движения в целом. ДАН СССР, 1952, 86, № 3.
4. *Зубов В. И.* Лекции по теории управления. М.: Наука, 1975.

Ереванский государственный
университет

Поступила в редакцию
7.XII. 1983