

# **УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ**

УДК 62-503.4

*Александрова И. Е., д-р техн. наук, Александрова Т. Е., канд. техн. наук*

## **К ВОПРОСУ СИНТЕЗА РОБАСТНОГО СТАБИЛИЗАТОРА ТАНКОВОЙ ПУШКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА ФУНКЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ**

**Постановка задачи.** В процессе эксплуатации любой технической системы значения ее параметров отклоняются от номинальных. При этом в той или иной степени изменяются динамические характеристики системы. Динамическую систему будем называть робастной, если случайные изменения ее параметров не приводят к существенному изменению динамических характеристик системы. Для синтеза робастных динамических систем используют аппарат теории чувствительности [1, 2]. Основные задачи, рассматриваемые в теории чувствительности, состоят в анализе влияния малых отклонений конструктивных параметров на динамическую систему, а также в синтезе динамической системы, малочувствительной к изменению этих параметров.

Одной из основных тактико-технических характеристик танка является точность стрельбы из основного вооружения, которая определяется следующими факторами:

- точностью стабилизации линии прицеливания относительно направления на цель;
- точностью выставки оси направления выстрела относительно линии прицеливания с помощью танкового баллистического вычислителя;
- точностью стабилизации оси канала ствола танковой пушки относительно оси направления выстрела;
- точностью прогнозирования момента разрешения выстрела, когда ось канала ствола максимально приближается к оси направления выстрела и минимально деформирована вследствие упругих колебаний ствола.

Основным элементом системы наведения и стабилизации танковой пушки является собственно стабилизатор, с помощью которого осуществляется стабилизация оси канала ствола танковой пушки относительно оси направления выстрела. Наиболее серьезные внешние возмущения действуют на танковую пушку в канале вертикального наведения вследствие колебаний подрессоренной части корпуса танка [3]. Для обеспечения высокой точности работы стабилизатора в канале вертикального наведения необходимо полное соответствие значений конструктивных параметров стабилизатора их номинальным значениям. Вместе с тем, коэффициент вязкости рабочей жидкости гидросистемы стабилизатора канала вертикального наведения изменяется в широком диапазоне в зависимости от температуры окружающей среды, что приводит к значительному снижению точности стабилизации по сравнению с точностью, обеспечиваемой стабилизатором при номинальном значении коэффициента вязкости рабочей жидкости.

Целью настоящей работы является поиск путей разработки робастных стабилизаторов, обеспечивающих высокую точность стабилизации оси канала ствола танковой пушки относительно оси направления выстрела при нестабильном значении коэффициента вязкости рабочей жидкости гидросистемы.

**Основная часть.** Пусть объект стабилизации, представляющий собой совокупность танковой пушки и электрогидравлического усилителя, описывается векторно-матричным дифференциальным уравнением.

$$\dot{X}(t) = A(\beta)X(t) + BU(t), \quad (1)$$

где  $X(t)$  – вектор состояния объекта;  $U(t)$  – вектор управления;  $A(\beta)$  – собственная матрица объекта;  $\beta$  варьируемый нестабильный параметр объекта;  $B$  – матрица управления.

Допустим также, что стабилизатор реализует линейный алгоритм управления

$$U(t) = CX(t), \quad (2)$$

где  $C$  – матрица коэффициентов усиления стабилизатора.

Тогда поведение замкнутой системы стабилизации “объект–стабилизатор” описывается дифференциальным уравнением

$$\dot{X}(t) = [A(\beta) + BC]X(t). \quad (3)$$

Положим, что  $\beta = \beta_0$  где  $\beta_0$  – номинальное значение варьируемого параметра, а точность стабилизации будем оценивать значением функционала

$$I(\beta_0, C) = \int_0^T \langle X(t), QX(t) \rangle dt, \quad (4)$$

вычисленного на решениях уравнения (3) при начальных условиях  $X(0)$ .

В соответствии с принципом минимакса [4, 5] функционал (4) может быть записан в виде

$$I[\beta_0, C, X(0)] = \langle X(0), K[\beta_0, C]X(0) \rangle, \quad (5)$$

где квадратная симметрическая матрица  $K[\beta_0, C]$  удовлетворяет матричному алгебраическому уравнению

$$K[\beta_0, C] \cdot [A(\beta_0) + BC] + [A(\beta_0) + BC]^T K[\beta_0, C] + Q = 0, \quad (6)$$

а матрица коэффициентов усиления стабилизатора  $C^*$  отыскивается в результате решения задачи минимакса

$$I[\beta_0, C^*, X^*(0)] = \min_{C \in G_C} \max_{X(0) \in G_X} \langle X(0), K[\beta_0, C]X(0) \rangle, \quad (7)$$

где  $G_C$  – множество допустимых значений коэффициентов усиления стабилизатора (элементов матрицы  $C$ );  $G_X$  – множество допустимых значений вектора  $X(t)$ .

В качестве множества  $G_C$  обычно используется область устойчивости замкнутой системы (3) в пространстве элементов матрицы  $C$ .

Предположим теперь, что значение варьируемого нестабильного параметра непрерывно изменяется

$$\beta = \beta_0 + \Delta\beta(t) \quad (8)$$

и требуется отыскать матрицу  $C^* \in G_c$ , обеспечивающую максимальную точность замкнутой системы (3), в смысле минимума интегрального квадратичного функционала (4), при условии (8).

Введем в рассмотрение вектор чувствительности [1]

$$S(t) = \frac{\partial X(t)}{\partial \beta} = \left[ \frac{\partial X_1(t)}{\partial \beta} \quad \frac{\partial X_2(t)}{\partial \beta} \quad \dots \quad \frac{\partial X_n(t)}{\partial \beta} \right]^T,$$

удовлетворяющий векторно-матричному дифференциальному уравнению

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= \frac{\partial \dot{X}(t)}{\partial \beta} = \frac{\partial}{\partial \beta} \{ [A(\beta) + BC]X(t) \} = \\ &= \frac{\partial}{\partial \beta} [A(\beta) + BC]X(t) + [A(\beta_0) + BC] \cdot \frac{\partial X(t)}{\partial \beta} = \\ &= \frac{\partial}{\partial \beta} [A(\beta) + BC]X(t) + [A(\beta_0) + BC]S(t) \end{aligned} \quad (9)$$

с начальным условием  $S(0) = 0$ .

Матрица  $C \in G_c$ , доставляет замкнутой системе стабилизации (3) свойство робастности к изменению варьируемого параметра  $\beta$ , если на решениях дифференциального уравнения (9) достигает максимума интегральный квадратичный функционал

$$J(\beta_0, C) = \int_0^T \langle S(t), RS(t) \rangle dt. \quad (10)$$

Одна и та же матрица  $C \in G_c$  не может одновременно обеспечить минимум функционала (4) и (10), поэтому введем аддитивный функционал

$$Z(\beta_0, C) = \int_0^T [\langle X(t), QX(t) \rangle + \langle S(t), RS(t) \rangle] dt, \quad (11)$$

Матрица  $C^* \in G_c$ , обеспечивает максимальную точность замкнутой системы стабилизации (3) и ее робастность к изменению параметра  $\beta$ , если эта матрица обеспечивает достижение минимакса аддитивного функционала (11) на решениях расширенной системы (3), (9).

Введем расширенный вектор состояния размерности  $2n$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ \dots \\ S(t) \end{bmatrix},$$

а также блочные матрицы размерностью  $2n \times 2n$ .

$$P(\beta_0, C) = \left[ \begin{array}{c|c} A(\beta_0) + BC & 0 \\ \hline \frac{\partial}{\partial \beta} [A(\beta) + BC]_{\beta=\beta_0} & A(\beta_0) + BC \end{array} \right]; \quad N = \left[ \begin{array}{c|c} Q & 0 \\ \hline 0 & R \end{array} \right].$$

В соответствии с принятыми обозначениями уравнение возмущенного движения расширенной системы (3), (9) и аддитивный функционал (11) записываются в виде

$$\dot{Y}(t) = P(\beta_0, C)Y(t); \quad (12)$$

$$Z(\beta_0, C) = \int_0^T \langle Y(t), Y(t) \rangle dt. \quad (13)$$

Используя принцип минимакса, функционал (13) представим в виде определено-положительной квадратичной формы

$$Z(\beta_0, C) = \langle Y(0), K(\beta_0, C)Y(0) \rangle, \quad (14)$$

где квадратная симметрическая матрица  $K(\beta_0, C)$  удовлетворяет матричному алгебраическому

$$K(\beta_0, C)P(\beta_0, C) + P^T(\beta_0, C)K(\beta_0, C) + N = 0. \quad (15)$$

Матрицу  $K(\beta_0, C)$  можно представить в виде блочной матрицы размерностью  $2n \times 2n$ , каждый из четырех блоков которой имеет размерность  $n \times n$ .

$$K(\beta_0, C) = \begin{bmatrix} K_1(\beta_0, C) & K_2(\beta_0, C) \\ K_2^T(\beta_0, C) & K_4(\beta_0, C) \end{bmatrix}.$$

В связи с тем, что  $S(0) = 0$ , функционал (14) равен

$$Z[\beta_0, C^*, X^*(0)] = \langle X(0), K_1(\beta_0, C)X(0) \rangle. \quad (16)$$

Тогда матрица  $C^* \in G_c$  определяется из условия минимакса функционала (16)

$$Z[\beta_0, C^*, X^*(0)] = \min_{C \in G_c} \max_{X(0) \in G_X} \langle X(0), K_1(\beta_0, C)X(0) \rangle.$$

В работе [1] при синтезе робастной системы стабилизации рекомендуется в алгоритме стабилизации использовать информацию о значениях функций чувствительности, полученных при решении системы (9). В этом случае блок-схема робастного стабилизатора принимает вид, представленный на рисунке.

Первый (внутренний) контур стабилизатора формирует алгоритм стабилизации в виде (2)

$$U_1(t) = CX(t). \quad (17)$$

Второй (внешний) контур стабилизации формирует алгоритм вида

$$U_2(t) = DS(t), \quad (18)$$

а обобщенный алгоритм стабилизации записывается:

$$U(t) = U_1(t) + U_2(t) = CX(t) + DS(t). \quad (19)$$

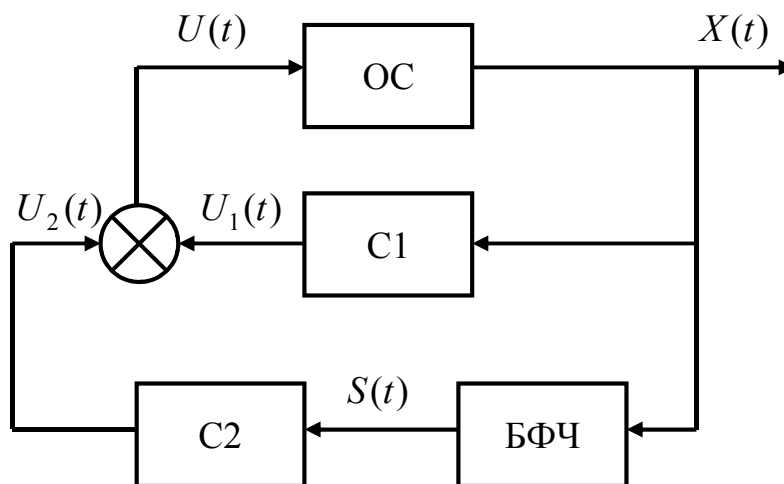


Рис. Блок-схема робастного стабилизатора: ОС – объект стабилизации БФЧ – блок формирования функций чувствительности; С1 – первый контур стабилизатора; С2 – второй контур стабилизатора

Подставляя соотношение (19) в правую часть уравнения (1), получаем

$$\dot{X}(t) = [A(\beta_0) + BC]X(t) + BDS(t). \quad (20)$$

Требуется отыскать такие значения элементов матриц  $C^* \in G_c$  и  $D^* \in G_D$ , которые на решениях расширенной системы (20), (9) доставляют минимум аддитивному функционалу (11), где  $G_D$  – множество допустимых матриц  $D$ .

Обычно объединение множеств  $G_c$  и  $G_D$  представляет собой область устойчивости расширенной системы (20), (9) в пространстве варьируемых параметров стабилизатора (19).

В рассматриваемом случае блочная матрица  $P(\beta_0, C, D)$  принимает следующий вид

$$P(\beta_0, C, D) = \left[ \begin{array}{c|c} A(\beta_0) + BC & BD \\ \hline \frac{\partial}{\partial \beta} [A(\beta) + BC]_{\beta=\beta_0} & A(\beta_0) + BC \end{array} \right].$$

В остальном процедура решения задачи синтеза робастного стабилизатора аналогична рассмотрению ранее с учетом зависимости матрицы  $K(\beta_0, C, D)$  от двух матриц  $C$  и  $D$ , присутствующих в алгоритме стабилизации (19), а оптимальные матрицы  $C^* \in G_c$  и  $D^* \in G_c$  определяются из условия минимакса функционала

$$Z[\beta_0, C^*, D^*, X^*(0)] = \min_{C \in G_c} \min_{D \in G_D} \max_{X(0) \in G_X} \langle X(0), K(\beta_0, C, D)X(0) \rangle.$$

**Пример.** Возмущенное движение оси канала ствола танковой пушки в канале вертикального наведения приближенно описывается дифференциальным уравнением [6]

$$I_0 \ddot{\varphi}(t) = M_c(t), \quad (21)$$

где  $M_C(t)$  – стабилизирующий момент, определяемый зависимостью

$$M_C(t) = K_M \left[ -K_\varphi \varphi(t) - K_{\dot{\varphi}} \dot{\varphi}(t) \right] \quad (22)$$

$I_0$  – момент инерции таковой пушки относительно оси цапф;  $K_M$  – коэффициент усиления мощности электрогидравлического усилителя;  $K_\varphi$ ,  $K_{\dot{\varphi}}$  – коэффициенты усиления электронного блока стабилизатора.

Подставим (22) в (21). В результате получаем дифференциальное уравнение возмущенного движения замкнутой системы стабилизации

$$\ddot{\varphi}(t) = b \left[ -K_\varphi \varphi(t) - K_{\dot{\varphi}} \dot{\varphi}(t) \right] \quad (23)$$

где  $b = \frac{K_M}{I_0}$ .

Коэффициент усиления мощности электрогидравлического усилителя стабилизатора танковой пушки зависит от вязкости рабочей жидкости, которая в свою очередь зависит от ее температуры. Таким образом, коэффициент в уравнении (23) имеет нестабильное значение и изменяется в процессе выполнения танком боевой задачи. На первом этапе положим, что коэффициент  $b$  имеет номинальное значение  $b = b_0$ .

Задача синтеза оптимального стабилизатора заключается в отыскании его коэффициента усиления  $K_\varphi$  и  $K_{\dot{\varphi}}$ , таких, чтобы на решениях уравнения (23) достигал минимума интегральный квадратичный функционал

$$I = \int_0^T \left[ q_1 \varphi^2(t) + q_2 \dot{\varphi}^2(t) \right] dt, \quad (24)$$

где  $q_1$  и  $q_2$  – весовые коэффициенты.

С помощью замены переменных систему (23) и функционал (24) представим в виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) &= -b k_\varphi x_1(t) - b k_{\dot{\varphi}} x_2(t); \end{aligned} \quad (25)$$

$$I = \int_0^T \left[ q_1 x_1^2(t) + q_2 x_2^2(t) \right] dt. \quad (26)$$

Тогда соответствующие векторы и матрицы записываются

$$\begin{aligned} X(t) &= \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}; \quad A + BC = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_0 k_\varphi & -b_0 k_{\dot{\varphi}} \end{bmatrix}; \\ Q &= \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{bmatrix}; \quad C = \left[ -k_\varphi \quad -k_{\dot{\varphi}} \right] \end{aligned}$$

Квадратную симметрическую матрицу  $K$  будем отыскивать в виде

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{12} & k_{22} \end{bmatrix}.$$

Подставляя соответствующие матрицы в матричное уравнение (6), запишем систему алгебраических уравнений для отыскания неизвестных элементов матрицы  $K$

$$\begin{aligned} -2b_0k_\varphi k_{12} + q_1 &= 0; \\ k_{11} - b_0k_\varphi k_{12} - b_0k_\varphi k_{22} &= 0; \\ -2k_{12} - 2b_0k_\varphi k_{22} + q_2 &= 0, \end{aligned} \tag{27}$$

решения которых

$$\begin{aligned} k_{11} &= \frac{q_1k_\varphi}{2k_\varphi} + \frac{q_1}{2bk_\varphi} + \frac{q_2k_\varphi}{2k_\varphi}; \\ k_{12} &= \frac{q_1}{2k_\varphi}; \\ k_{22} &= \frac{1}{2bk_\varphi} \left( \frac{q_1}{bk_\varphi} + q_2 \right), \end{aligned} \tag{28}$$

позволяют получить функционал (5), минимум которого определяет оптимальные значения коэффициентов  $k_\varphi^*$  и  $k_{\dot{\varphi}}^*$ .

Положим, что  $b = b_0 + \Delta b(t)$ . Тогда матрицы  $P(b_0, k_\varphi, k_{\dot{\varphi}})$  и  $N$  размерностью  $4 \times 4$  записываются:

$$P(b_0, k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -b_0k_\varphi & -b_0k_{\dot{\varphi}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_\varphi & -k_{\dot{\varphi}} & -b_0k_\varphi & -b_0k_{\dot{\varphi}} \end{bmatrix};$$

$$N = \begin{bmatrix} q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_2 \end{bmatrix}.$$

Матрицу  $K(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}, b_0)$  будем отыскивать в виде

$$K(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}, b_0) = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} & k_{34} \\ k_{14} & k_{24} & k_{34} & k_{44} \end{bmatrix}.$$

Матричное алгебраическое уравнение (15) эквивалентно десяти уравнениям относительно неизвестных элементов матрицы  $K(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}, b_0)$

$$\begin{aligned}
 & -2b_0k_\varphi k_{12} - 2k_\varphi k_{14} + q_1 = 0; \\
 & k_{11} - b_0k_{\dot{\varphi}}k_{12} - k_{\dot{\varphi}}k_{14} - b_0k_\varphi k_{22} - k_\varphi k_{24} = 0; \\
 & -b_0k_\varphi k_{14} - b_0k_\varphi k_{23} - k_\varphi k_{34} = 0; \\
 & k_{13} - b_0k_{\dot{\varphi}}k_{14} - b_0k_\varphi k_{24} - k_\varphi k_{44} = 0; \\
 & 2k_{12} - 2b_0k_{\dot{\varphi}}k_{22} - 2k_{\dot{\varphi}}k_{24} + q_2 = 0; \\
 & -b_0k_\varphi k_{24} + k_{13} - b_0k_{\dot{\varphi}}k_{23} - k_{\dot{\varphi}}k_{34} = 0; \\
 & k_{23} - 2b_0k_{\dot{\varphi}}k_{24} + k_{14} - k_{\dot{\varphi}}k_{44} = 0; \\
 & 2b_0k_\varphi k_{34} + r_1 = 0; \\
 & k_{23} - b_0k_{\dot{\varphi}}k_{34} - b_0k_\varphi k_{44} = 0; \\
 & 2k_{34} - 2b_0k_{\dot{\varphi}}k_{44} + r_2 = 0.
 \end{aligned} \tag{29}$$

Из системы алгебраических уравнений (29) отыщем элементы матрицы

$$\begin{aligned}
 K_1(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}, b_0) &= \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{12} & k_{22} \end{bmatrix} \\
 k_{11} &= \frac{q_1k_\varphi}{2k_\varphi} + \frac{q_1}{2b_0k_{\dot{\varphi}}} + \frac{q_2k_\varphi}{2k_{\dot{\varphi}}} + \frac{k_\varphi}{4b_0^3k_{\dot{\varphi}}^2} \left( \frac{r_1}{b_0k_{\dot{\varphi}}} + r_2 \right); \\
 k_{12} &= \frac{q_1}{2b_0k_\varphi} + \frac{1}{4b_0^3k_{\dot{\varphi}}} \left( \frac{r_1}{b_0k_{\dot{\varphi}}} + r_2 \right); \\
 k_{22} &= \frac{1}{2b_0k_\varphi} \left( \frac{q_1}{b_0k_\varphi} + q_2 \right) + \frac{1}{4b_0^3k_{\dot{\varphi}}^2} \left( \frac{r_1}{b_0k_{\dot{\varphi}}} + r_2 \right) + \\
 &+ \frac{1}{2b_0^3k_{\dot{\varphi}}} \left( \frac{r_1}{b_0k_\varphi} + \frac{r_2}{2} - \frac{k_\varphi r_2}{4b_0^2k_\varphi} - \frac{r_2}{4b_0k_{\dot{\varphi}}} \right).
 \end{aligned} \tag{30}$$

и сформируем функционал (15), минимакс которого определяет оптимальные значения коэффициентов  $k_\varphi^*$ , и  $k_{\dot{\varphi}}^*$ .

Сравнение соотношений (28) и (30) позволяет сделать вывод, что при  $r_1 = r_2 = 0$  соотношения (30) выражаются в соотношениях (28).

Наконец, рассмотрим последний случай, когда стабилизатор реализует алгоритм (19), который в рассматриваемом примере записывается в виде:

$$M_c(t) = k_M \left[ -k_\varphi \varphi(t) - k_{\dot{\varphi}} \dot{\varphi}(t) + d_1 s_1(t) + d_2 s_2(t) \right], \tag{31}$$

где  $s_1(t) = \frac{\partial \varphi(t)}{\partial b}$ ;  $s_2(t) = \frac{\partial \dot{\varphi}(t)}{\partial b}$  – функции чувствительности. Тогда собственная матрица расширенной системы размерности  $4 \times 4$  равна



$$P(b_0, k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}, d_1, d_2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -b_0 k_\varphi & -b_0 k_{\dot{\varphi}} & b_0 d_1 & b_0 d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_\varphi & -k_{\dot{\varphi}} & -b_0 k_\varphi & -b_0 k_{\dot{\varphi}} \end{bmatrix},$$

а матрицы  $N$  и  $K$  той же размерности имеют прежний вид. Подставляя эти матрицы в уравнение (15), получаем систему из 10 алгебраических уравнений относительно неизвестных элементов матрицы  $K(b_0, k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}, d_1, d_2)$

$$\begin{aligned} -2b_0 k_{12} k_\varphi - 2k_\varphi k_{14} + q_1 &= 0; \\ k_{11} - b_0 k_{12} k_{\dot{\varphi}} - k_{14} k_{\dot{\varphi}} - b_0 k_{22} k_\varphi - k_\varphi k_{24} &= 0; \\ k_{12} b_0 d_1 - k_{14} b_0 k_\varphi - k_{23} b_0 k_\varphi - k_{34} k_\varphi &= 0; \\ k_{12} b_0 d_2 + k_{13} - k_{14} b_0 k_{\dot{\varphi}} - k_{24} b_0 k_\varphi - k_{44} k_\varphi &= 0; \\ 2k_{12} - 2k_{22} b_0 k_{\dot{\varphi}} - 2k_{24} k_{\dot{\varphi}} + q_2 &= 0; \\ k_{22} b_0 d_1 - k_{24} b_0 k_\varphi + k_{13} - k_{23} b_0 k_{\dot{\varphi}} - k_{34} k_{\dot{\varphi}} &= 0; \\ k_{22} b_0 d_2 + k_{23} - 2k_{24} b_0 k_{\dot{\varphi}} + k_{14} - k_{44} k_{\dot{\varphi}} &= 0; \\ 2k_{23} b_0 d_1 - 2k_{34} b_0 k_\varphi + r_1 &= 0; \\ k_{23} b_0 d_2 + k_{33} - k_{34} b_0 k_{\dot{\varphi}} + k_{24} b_0 d_1 - k_{44} b_0 k_\varphi &= 0; \\ 2k_{24} b_0 d_2 + 2k_{34} - 2k_{44} b_0 k_{\dot{\varphi}} + r_2 &= 0. \end{aligned} \quad (32)$$

Легко видеть, что при  $d_1 = d_2 = 0$  соотношения (32) выражаются в соотношения (29).

Отыщем из системы (32) элементы блока  $K_1[b_0, k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}, d_1, d_2, X(0)]$  матрицы  $K(b_0, k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}, d_1, d_2)$  и сформируем функционал

$$Z[b_0, k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}, d_1, d_2, X(0)] = \langle X(0), K_1(b_0, k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}, d_1, d_2, X(0)) X(0) \rangle,$$

минимум которого определяет оптимальные значения параметров алгоритма (31)  $k_\varphi^*, k_{\dot{\varphi}}^*, d_1^*$  и  $d_2^*$ .

### Выводы.

- робастные стабилизаторы могут быть синтезированы с помощью аппарата функций чувствительности;
- алгоритм стабилизации робастной системы может содержать информацию об изменении функции чувствительности, а может и не содержать такой информации, а использовать ее при расчете констант алгоритма.

**Литература:** 1. Розенвассер Е. Н. Чувствительность систем автоматического регулирования / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. – Л.: Энергия, 1971. – 292. 2. Томович Р. Общая теория чувствительности / Р. Томович, М. Вукобратович. – М.: Сов. радио, 1972. – 240 с. 3. Александрова Т. Е. Имитационное моделирование внешних возмущений действующих на

танковую пушку / Т. Е. Александрова, И. Е. Александрова, С. Н. Беляев // *Механіка та машинобудування*. – 2011. – №1. – С. 43-50. 4. Александров Е. Е. Автоматизированное проектирование динамических систем с помощью функций Ляпунова / Е. Е. Александров, М. В. Бех. – Харьков: Основа, 1993. – 113 с. 5. Александров Е. Е. Статистические методы исследования электромеханических систем / Е. Е. Александров, Б. И. Кузнецов, А. Н. Сиротенко и др. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2006. – 304 с. 6. Александров С. С. Автоматизоване проектування танкових автоматичних систем / С. С. Александров, Т. С. Александрова, В. М. Грищенко та ін. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2003. – 137 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Rozenvasser E. N. Chuvstvitel'nost' sistem avtomaticheskogo regulirovanija / E. N. Rozenvasser, R. M. Jusupov. – L.: Jenergija, 1971. – 292. 2. Tomovich R. Obwaja teorija chuvstvitel'nosti / R. Tomovich, M. Vukobratovich. – M.: Sov. radio, 1972. – 240 s. 3. Aleksandrova T. E. Imitacionnoe modelirovanie vneshnih vozmuwenij dejstvujuwih na tankovuju pushku / T. E. Aleksandrova, I. E. Aleksandrova, S. N. Beljaev // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2011. – №1. – S. 43-50. 4. Aleksandrov E. E. Avtomatizirovanное proektirovanie dinamicheskikh sistem s pomow'ju funkcij Ljapunova / E. E. Aleksandrov, M. V. Beh. – Har'kov: Osнова, 1993. – 113 s. 5. Aleksandrov E. E. Statisticheskie metody issledovanija jelektromehanicheskikh sistem / E. E. Aleksandrov, B. I. Kuznecov, A. N. Sirotenko i dr. – Har'kov: NTU “HPI”, 2006. – 304 s. 6. Aleksandrov S. S. Avtomatizovane proektuvannja tankovih avtomatichnih sistem / S. S. Aleksandrov, T. S. Aleksandrova, V. M. Griwenko ta in. – Harkiv: NTU “HPI”, 2003. – 137 s.

Александрова І.Є., Александрова Т. С.

#### ДО ПИТАННЯ СИНТЕЗУ РОБАСТНОГО СТАБІЛІЗАТОРА ТАНКОВОЇ ГАРМАТИ З ВИКОРИСТАННЯМ АПАРАТА ФУНКЦІЙ ЧУТЛИВОСТІ

Розглядаються методи синтезу робастних стабілізаторів, що забезпечують високу точність стабілізації осі каналу ствола танкової гармати відносно лінії напрямку пострілу при нестабільному значенні коефіцієнта в'язкості робочої рідини гідросистеми.

Александрова И. Е., Александрова Т. Е.

#### К ВОПРОСУ СИНТЕЗА РОБАСТНОГО СТАБИЛИЗАТОРА ТАНКОВОЙ ПУШКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА ФУНКЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Рассматриваются методы синтеза робастных стабилизаторов, обеспечивающих высокую точность стабилизации оси канала ствола танковой пушки относительно линии направления выстрела при нестабильном значении коэффициента вязкости рабочей жидкости гидросистемы.

Alexandrova I.E., Alexandrova T.E.,

#### ABOUT SYNTHESIS OF ROBUST STABILIZER OF TANK GUN WITH USING OF SENSITIVITY FUNCTIONS APPARATUS

The metod of synthesis of robust stabilizers, providing high-precision stabilization of the canal of the barrel tank gun on the line of the direction of the shot in unstable value of the coefficient of viscosity of the working fluid of the hydraulic system.

---