

УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.77

Александрова Т.Е., канд. техн. наук; Костяник И.В., канд. техн. наук;
Истомин А.Е., канд. техн. наук

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО СТАБИЛИЗАТОРА ТАНКОВОЙ ПУШКИ

Постановка задачи. Рассмотрим стабилизируемую танковую пушку с электрогидравлическим исполнительным органом, возмущенное движение которой описывается дифференциальными уравнениями [1]:

$$\begin{aligned} I_n \ddot{\varphi}(x) &= -k_M k_D \beta(t); \\ T_{k1}^2 \ddot{\beta}(t) + T_{k2} \dot{\beta}(t) + \beta(t) &= \frac{k_e k_y}{c} u(t); \\ u(t) &= k_\varphi \varphi(t) + k_\varphi k_c \dot{\varphi}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ - угол поворота пушки относительно оси цапф; $\beta(t)$ - угол поворота якоря электромагнита электрогидравлического усилителя; $u(t)$ - сигнал на выходе электронного блока стабилизатора; T_{k1} , T_{k2} - постоянные времени электромагнита; I_n - момент инерции пушки относительно оси цапф; k_φ , $k_\dot{\varphi}$ - варьируемые параметры стабилизатора; c - коэффициент жесткости фиксирующей пружины якоря электромагнита; k_M, k_D, k_e, k_y, k_c - коэффициенты пропорциональности.

Требуется отыскать значения варьируемых параметров стабилизатора, обеспечивающий максимальный запас устойчивости и максимальное быстродействие замкнутой системы (1), и показать, что значения этих параметров единственны.

Основная часть. Подставим последнее соотношение системы (1) во второе уравнение. В результате получим математическую модель замкнутой системы стабилизации, которую разрешим относительно старших производных:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}(x) &= -\frac{k_M k_D}{I_n} \beta(t); \\ \ddot{\beta}(t) &= -\frac{1}{T_{k1}^2} \beta(t) - \frac{T_{k2}}{T_{k1}^2} \dot{\beta}(t) + \frac{k_e k_y}{c T_{k1}^2} k_\varphi \varphi(t) + \frac{k_e k_y}{c T_{k1}^2} k_\varphi k_c \dot{\varphi}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Систему (2) запишем в нормальной форме, производя замену переменных $x_1(t) = \varphi(t); x_2(t) = \dot{\varphi}(t); x_3(t) = \beta(t); x_4(t) = \dot{\beta}(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{k_M k_D}{I_n} x_3(t); \\ \dot{x}_3(t) &= x_4(t); \\ \dot{x}_4(t) &= \frac{k_e k_y}{c T_{k1}^2} k_\varphi x_1(t) + \frac{k_e k_y}{c T_{k1}^2} k_c k_{\dot{\varphi}} x_2(t) - \frac{1}{T_{k1}^2} x_3(t) - \frac{T_{k2}}{T_{k1}^2} x_4(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Собственная матрица системы (3) может представлена в виде:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_M k_D}{I_n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_e k_y}{c T_{k1}^2} k_\varphi & \frac{k_e k_y}{c T_{k1}^2} k_c k_{\dot{\varphi}} & -\frac{1}{T_{k1}^2} & -\frac{T_{k2}}{T_{k1}^2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

а характеристическое уравнение замкнутой системы (3) записывается

$$\det(A - ES) = S^4 + \frac{T_{k2}}{T_{k1}^2} S^3 + \frac{1}{T_{k1}^2} S^2 + \frac{k_M k_D k_e k_y}{c I_n T_{k1}^2} k_c k_{\dot{\varphi}} S + \frac{k_M k_D k_e k_y}{c I_n T_{k1}^2} k_\varphi = 0. \quad (5)$$

Значения параметров танковой пушки с электрогидравлическим исполнительным органом составляют: $I_n = 736,9 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$; $T_{k1} = 10^{-2} \text{ с}$; $T_{k2} = -0,0005 \text{ с}$; $c = 100 \text{ Нм}$; $k_c = 0,2 \text{ с}^2$; $k_M = 0,0006 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{Па}^{-1}$; $k_D = 1,228 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $k_e = 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{А}^{-1}$; $k_y = 0,01 \text{ Ом}^{-1}$. Тогда матрица (4) и характеристическое уравнение (5) могут быть записаны в виде:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 10^3 k_\varphi & 0,2 \cdot 10^3 k_{\dot{\varphi}} & -10^4 & -5 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$S^4 + 5S^3 + 10^4 S^2 + 0,2 \cdot 10^4 k_{\dot{\varphi}} S + 10^4 k_\varphi = 0. \quad (7)$$

В характеристическом уравнении (7) произведем замену $S = \beta + j\omega$, выделим в уравнении (7) действительную и мнимую части, приравняем их нулю и из полученных уравнений выделим коэффициенты k_φ и $k_{\dot{\varphi}}$ [2]:

$$\begin{aligned}
 k_{\varphi} &= 3 \cdot 10^{-4} \beta^4 + 2 \cdot 10^{-4} \beta^2 \omega^2 - 10^{-4} \omega^4 + 10^{-3} \beta^3 + 10^{-3} \beta \omega^2 + \omega^2 + \beta^2; \\
 k_{\dot{\varphi}} &= -2 \cdot 10^{-3} \beta^3 + 2 \cdot 10^{-3} \beta \omega^2 - 7,5 \cdot 10^{-3} \beta^2 + 2,5 \cdot 10^{-3} \omega^2 - 10\beta.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

В плоскости варьируемых параметров $(k_{\varphi}, k_{\dot{\varphi}})$ с помощью соотношений (8) построим кривые при изменении ω от нуля до бесконечности при различных отрицательных значениях β . При $\beta=0$ построенная кривая представляет собой область устойчивости замкнутой системы стабилизации, а при $\beta < 0$ - кривые равной степени устойчивости, представленные на рисунке 1.

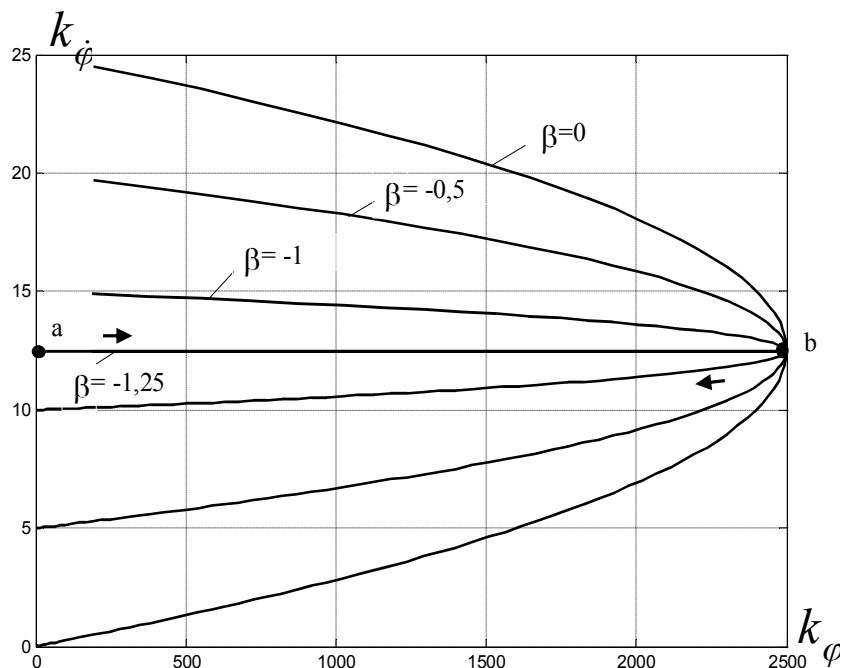


Рис.1. Кривые равной степени устойчивости системы (3)

При $\beta=-1,25$ кривые равной степени устойчивости стягиваются в отрезок прямой, параллельный оси абсцисс, ограниченный точками $a = 1,5613$ и $b = 2496,87$. Если значения варьируемых параметров k_{φ} и $k_{\dot{\varphi}}$ выбраны на отрезке (a, b) , то замкнутая система стабилизации имеет постоянный максимальный запас устойчивости. Всюду на отрезке (a, b) значение параметра $k_{\dot{\varphi}}$ постоянно и равно $k_{\dot{\varphi}}^* = 12,5$.

Комплексным критерием оптимальности, минимум которого обеспечивает, как высокий запас устойчивости, так и высокое быстродействие системы, является интегральный квадратичный функционал:

$$I = \int_0^{\infty} \langle X(t), QX(t) \rangle dt.
 \tag{9}$$

Вместе с тем, использование функционала (9) для решения задачи параметрического синтеза оптимальных стабилизаторов сдерживается отсутствием эффективных методов выбора силвестровой матрицы Q . В [3] показано, что

численное значение функционала (9), вычисленное на решениях системы

$$\dot{X}(t) = AX(t), \quad (10)$$

равно

$$I = \langle X(0), KX(0) \rangle, \quad (11)$$

где $X(0)$ - начальное условие системы (10); K - квадратная симметрическая матрица, удовлетворяющая матричному алгебраическому уравнению

$$KA + A^T K + Q = 0. \quad (12)$$

В системе (1) главной координатой является переменная $\varphi(t)$, поэтому в качестве начальных условий системы (1) выберем $\varphi(0) = x_1(0) \neq 0$; $\dot{\varphi}(0) = x_2(0) = 0$; $\beta(0) = x_3(0) = 0$; $\dot{\beta}(0) = x_4(0) = 0$. Действительно, в момент $t = 0$ танковая пушка отклонена от направления на цель на угол $\varphi(0)$ и находится в покое, а стабилизатор отключен, следовательно $\dot{\varphi}(0) = \beta(0) = \dot{\beta}(0) = 0$. После выбора цели в момент $t = 0$ стабилизатор включается и происходит наводка канала ствола на цель. При выбранных начальных условиях значение функционала (11) составляет

$$I(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = k_{11}(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}})x_1^2(0). \quad (13)$$

где $k_{11}(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}})$ - первый диагональный элемент матрицы $K(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}})$, удовлетворяющей уравнению (12).

В связи с тем, что положение точки минимума функционала (13) не зависит от $x_1^2(0)$, можно записать:

$$I(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = k_{11}(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}). \quad (14)$$

Квадратную симметрическую матрицу $K(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}})$ будем отыскивать в виде

$$K(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

а матрицу Q функционала (9) положим равной

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Подставим матрицы (6), (15) и (16) в матричное уравнение (12), которое эквивалентно системе алгебраических уравнений относительно неизвестных элементов матрицы (15):

$$\begin{aligned}
 2 \cdot 10^3 k_\varphi k_{14} + 1 &= 0; \\
 k_{11} + 0,2 \cdot 10^3 k_{\dot{\varphi}} k_{14} + 10^3 k_\varphi k_{24} &= 0; \\
 -10k_{12} - 10^4 k_{14} + 10^3 k_\varphi k_{34} &= 0; \\
 k_{13} - 5k_{14} + 10^3 k_\varphi k_{44} &= 0; \\
 k_{12} + 0,2 \cdot 10^3 k_{\dot{\varphi}} k_{24} &= 0; \\
 -10k_{22} - 10^4 k_{24} + k_{13} + 0,2 \cdot 10^3 k_{\dot{\varphi}} k_{34} &= 0; \\
 k_{23} - 5k_{24} + k_{14} + 0,2 \cdot 10^3 k_{\dot{\varphi}} k_{44} &= 0; \\
 -10k_{23} - 10^4 k_{34} &= 0; \\
 k_{33} - 5k_{34} - 10k_{24} - 10^4 k_{44} &= 0; \\
 k_{34} - 5k_{44} &= 0.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Из системы (17) получаем

$$k_{11}(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = \frac{k_{\dot{\varphi}}}{k_\varphi} + \frac{10^3 k_{\dot{\varphi}} + 2,5k_\varphi - 25 \cdot 10^3}{40k_{\dot{\varphi}}^2 - 10^3 k_{\dot{\varphi}} + 2,5k_\varphi}. \tag{18}$$

В соотношении (18) положим $k_{\dot{\varphi}} = k_{\dot{\varphi}}^* = 12,5$. В результате имеем

$$k_{11}(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}^*) = \frac{12,5}{k_\varphi} + \frac{2,5k_\varphi - 12,5 \cdot 10^3}{2,5k_\varphi - 6,25 \cdot 10^3}. \tag{19}$$

Продифференцируем (19) по k_φ и результат дифференцирования приравняем нулю. В результате получаем квадратное уравнение

$$k_\varphi^2 + 25,1 \cdot k_\varphi - 3 \cdot 10^4 = 0. \tag{20}$$

Решение уравнения (20) позволяет получить на отрезке (a, b) точку $k_\varphi = k_\varphi^* = 161,11$, доставляющую минимум функционалу

$$I(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}^*) = k_{11}(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}^*)$$

Точка $(k_\varphi^*, k_{\dot{\varphi}}^*)$ доставляет максимальный запас устойчивости и максимальное быстродействие замкнутой системе (1), а также обеспечивает высокое качество процессов стабилизации.

На рисунке 2 приведены переходные процессы в замкнутой системе стабилизации (3) для различных точек отрезка (a, b) . Кривая 1 соответствует значению $k_\varphi = 1,5613$, кривая 2 - значению $k_\varphi = 161,11$, а кривая 3 - значению $k_\varphi = 1000$.

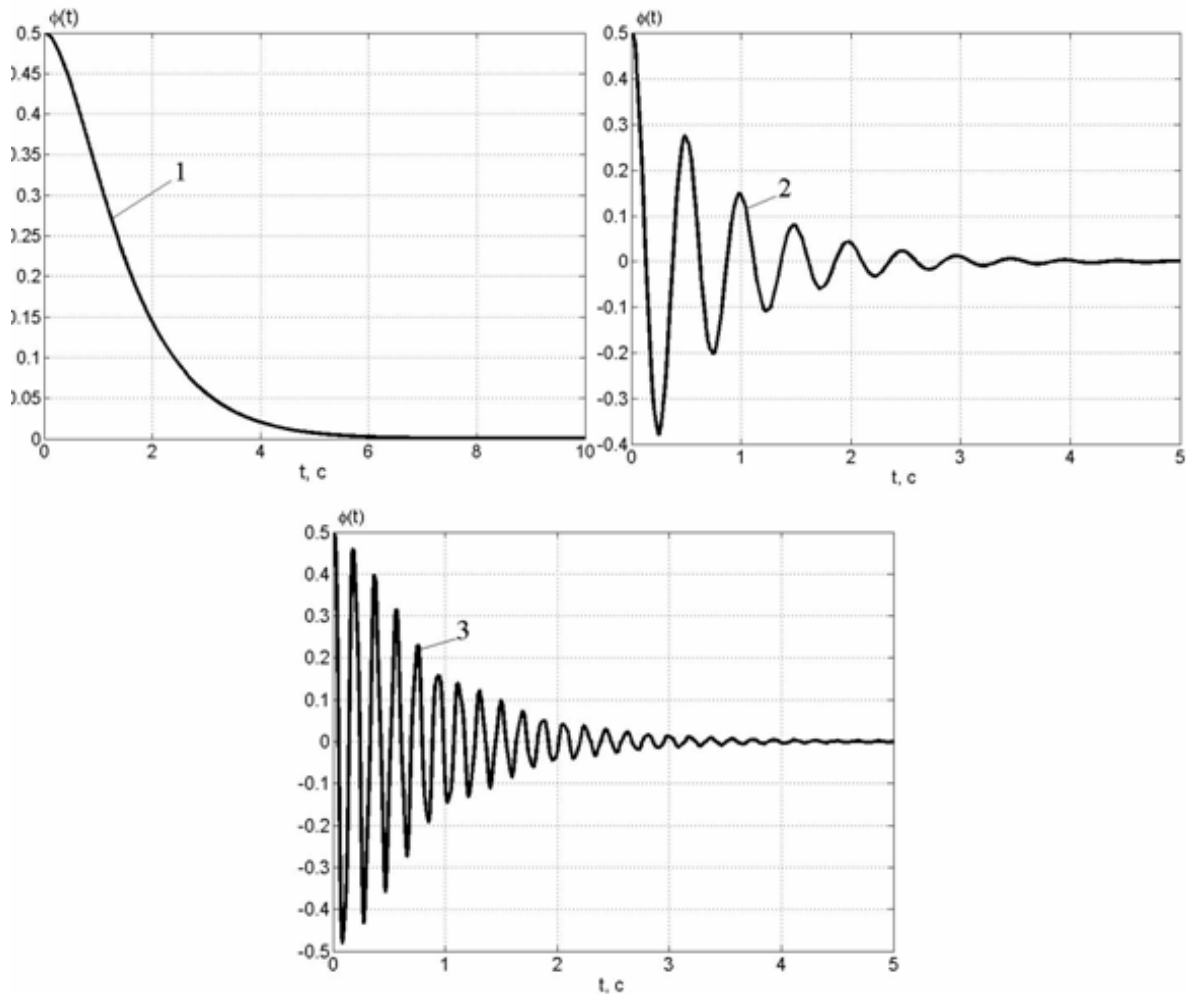


Рис. 2. Переходные процессы в замкнутой системе стабилизации (3)

На рисунке 3 приведен вид функции (18). Анализ рисунка 3 позволяет сделать вывод, что функция $k_{11}(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}})$ имеет единственный минимум с координатами $k_\varphi^* = 161,11$; $k_{\dot{\varphi}}^* = 12,5$.

На рисунке 4 приведены сечения функции $k_{11}(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}})$ при различных постоянных значениях $k_{\dot{\varphi}}$.

Анализ рисунков 3 и 4 позволяет сделать вывод о единственности минимума функции (18).

Выводы:

- выбор варьируемых параметров стабилизатора танковой пушки из условия обеспечения максимального запаса устойчивости замкнутой системы стабилизации позволяет обеспечить максимальный запас устойчивости и максимальное быстродействие замкнутой системы стабилизации, но не дает однозначного решения задачи параметрического синтеза;

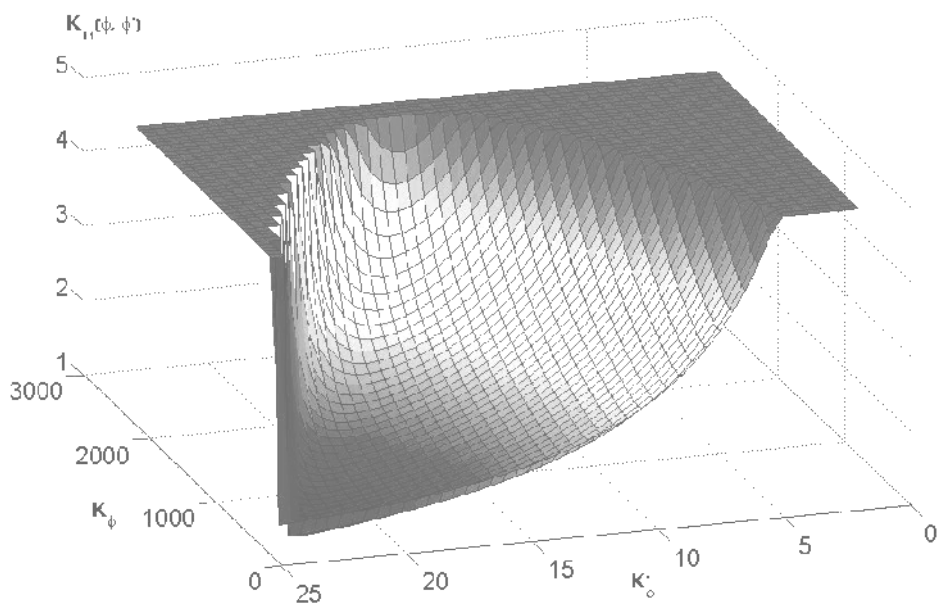


Рис. 3. Функция двух переменных (18)

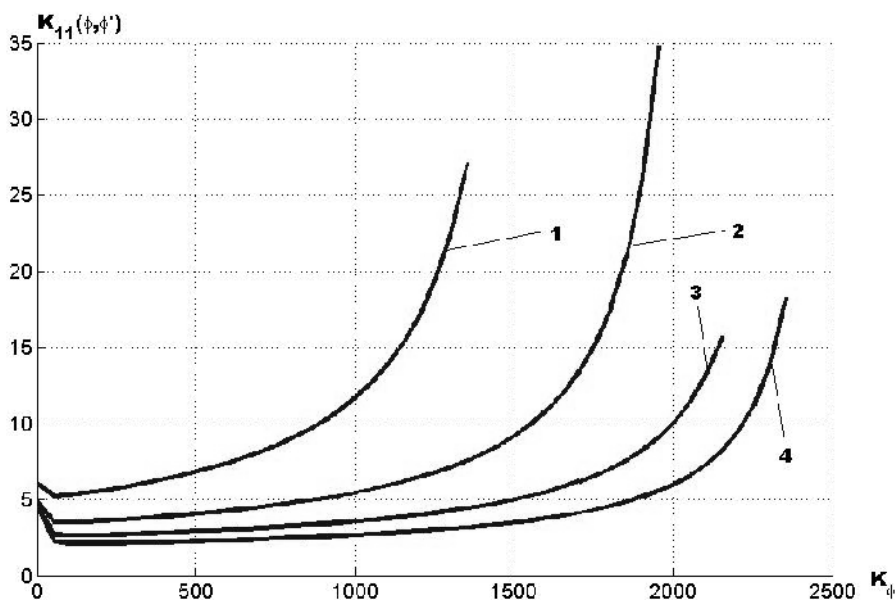


Рис. 4. Сечения функции (18) при: $k_{\dot{\phi}} = 5$ (кривая 1); $k_{\dot{\phi}} = 7,5$ (кривая 2); $k_{\dot{\phi}} = 10$ (кривая 3); $k_{\dot{\phi}} = 12,5$ (кривая 4)

- помимо обеспечения максимального запаса устойчивости и максимального быстродействия замкнутой системы стабилизации, необходимо обеспечить минимум интегрального квадратичного функционала на решениях системы дифференциальных уравнений возмущенного движения замкнутой системы.

- целевая функция задачи параметрического синтеза имеет единственный глобальный минимум.

Литература: 1. Аблесімов О.К. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т.3. Автоматичне керування озброєнням танків/ О.К. Аблесімов, Є.Є. Александров, Т.Є. Александрова. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 444с. 2. Орурк И.А. Новые

методы синтеза линейных и некоторых нелинейных динамических систем. – М.-Л.: Наука, 1965. – 207с. 3. Александров Е.Е. Автоматизированное проектирование динамических систем с помощью функций Ляпунова/ Е.Е. Александров, М.В. Бех. – Харьков: Основа, 1993. – 112с.

Bibliography (transliterated): 1. Ablesimov O.K. Avtomatichne keruvannja ruhomimi ob'ektami i tehno-logichnimi procesami. T.3. Avtomatichne keruvannja ozbroennjam tankiv/ O.K Ablesimov, С.С. Aleksandrov, Т.С. Aleksandrova. – Harkiv: NTU «HPI», 2008. – 444s. 2. Orurk I.A. Novye metody sinteza linejnyh i nekotoryh nelinejnyh dinamicheskikh sistem. – М.-Л.: Nauka, 1965. – 207s. 3. Aleksandrov E.E. Avtomatizirovannoe proektirovanie dinamicheskikh sistem s pomoshh'ju funkcij Ljapunova/ E.E. Aleksandrov, M.V. Beh. – Har'kov: Osnova, 1993. – 112s.

Александрова Т.С., Костяник І.В., Істомін О.Є.

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО СТАБІЛІЗАТОРА ТАНКОВОЇ ГАРМАТИ

Розглянуто задачу параметричного синтезу оптимального стабілізатора танкової гармати, що забезпечує мінімум інтегрального квадратичного функціоналу на рішеннях математичної моделі замкненої системи стабілізації.

Александрова Т.Е., Костяник И.В., Истомин А.Е.,

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО СТАБИЛИЗАТОРА ТАНКОВОЙ ПУШКИ

Рассмотрена задача параметрического синтеза оптимального стабилизатора танковой пушки, обеспечивающего минимум интегрального квадратичного функционала на решениях математической модели замкнутой системы стабилизации.

Alexandrova T.E., Kostyanik I.V., Istomin A.E.

PARAMETRIC SYNTHESIS OF OPTIMAL STABILIZER TANK GUN

The problem of parametric synthesis of optimal stabilizer tank gun that provides at least the integral quadratic functional on the solutions of the mathematical model of a closed system of stabilization is considered.

УДК 629.33:629.36:004.8

Ніконов О.Я., д-р техн. наук; Шуляков В.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕЧІТКИХ РЕГУЛЯТОРІВ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ АВТОМОБІЛЯ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Мета досліджень, постановка проблеми. Інтеграція гідравлічних пристроїв та електронних систем керування дозволяє вирішувати задачі підвищення якості процесів керування, адаптивного налаштування та підтримки параметрів або структури системи при дії на об'єкт керування випадкових збурень, діагностики відмов та несправностей при збереженні відносно невеликих маси та габаритів комплексу «привод-система керування».

Таким чином, постає актуальна задача створення сучасних електрогідравлічних перетворювачів на основі сучасних систем керування, здатних надійно працювати в умовах підвищеної запиленості зовнішнього середовища, великому перепаді температур, значних вібраціях та ударах та інших несприятливих факторах, що виникають при експлуатації автомобілів.