

Військово-технічні проблеми

УДК 519.81:681.51

Т.Е. Александрова, А.А. Лазаренко, А.В. Зейн

Национальный технический университет "ХПИ", Харьков

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПОСТРОЕНИЯ ИНВАРИАНТНОЙ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ТАНКОВОЙ ПУШКИ

Предлагается методика параметрического синтеза системы наведения и стабилизации танковой пушки, основанная на компромиссе между требованиями инвариантности к внешним возмущениям и устойчивости.

Ключевые слова: танковая пушка, система наведения и стабилизации, инвариантность к внешним возмущениям, устойчивость.

Введение

В работах [1 – 3] авторами рассмотрена структурная схема инвариантной системы наведения и стабилизации танковой пушки в канале вертикального наведения, а также рассматривается задача параметрического синтеза танковой системы. При этом математическая модель возмущенного движения объекта стабилизации записывается в виде:

$$I_n \ddot{\phi}(t) = k_M \Delta p(t) + M_B(t);$$

$$T_1^2 \Delta \ddot{p}(t) + T_2 \Delta \dot{p}(t) + \Delta p(t) = k_Y U(t), \quad (1)$$

а алгоритм стабилизации формируется в виде следующего соотношения

$$U(t) = k_\phi \phi(t) + k_{\dot{\phi}} \dot{\phi}(t) + k_p \Delta p(t) + k_{\dot{p}} \Delta \dot{p}(t). \quad (2)$$

Структурная схема замкнутой инвариантной системы стабилизации приведена на рис. 1, где приняты обозначения: $\phi(t)$ - угловое рассогласование оси канала ствола и линии прицеливания; $\Delta p(t)$ - разность давлений рабочей жидкости в полостях исполнительного гидроцилиндра; $M_B(t)$ - внешнее

возмущение, действующее на танковую пушку; $U(t)$ - выходной сигнал электронного блока; T_1 , T_2 - постоянные времени электрогидравлического усилителя; k_M , k_Y - коэффициенты пропорциональности; k_ϕ , $k_{\dot{\phi}}$, k_p , $k_{\dot{p}}$ - варьируемые параметры алгоритма стабилизации, подлежащие выбору; $W_{ЭГУ}(s)$ - передаточная функция электрогидравлического усилителя; $W_n(s)$ - передаточная функция танковой пушки; $W_{ЭБ}(s)$ - передаточная функция электронного блока, причем

$$W_{ЭГУ}(s) = \frac{k_Y}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1}; \quad W_n(s) = \frac{k_n}{s^2}, \quad k_n = \frac{k_M}{I_n}.$$

Точность стабилизации оси канала ствола танковой пушки будем оценивать величиной интегрального квадратичного функционала [4]

$$I = \int_0^T [\beta_1^2 \phi^2(t) + \beta_2^2 \dot{\phi}^2(t)] dt. \quad (3)$$

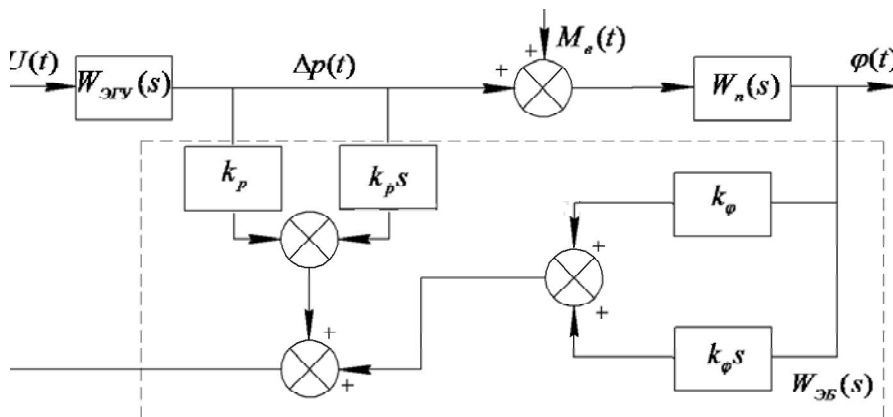


Рис. 1. Структурная схема замкнутой инвариантной системы наведения и стабилизации танковой пушки

Цель работы: отыскание значений варьируемых параметров алгоритма стабилизации (2), таких, чтобы на решениях замкнутой системы (1), (2) достигал минимума интегральный квадратичный функционал (3).

Основная часть

В работе [5] изложен разработанный алгоритм решения задачи параметрического синтеза танковой пушки, который основан на использовании программных продуктов Minimize пакета MathCAD или OptimizationToolbox пакета MatLAB. Вместе с тем применение разработанного алгоритма к рассматриваемой задаче встречает затруднения, обусловленные большими различиями значений переменных состояния. В самом деле, максимальные значения переменных $\phi(t)$ и $\dot{\phi}(t)$ составляют $\phi_{\max} = 1$ рад; $\dot{\phi}_{\max} = 4 \text{ c}^{-1}$, в то время как максимальные значения переменных $\Delta p(t)$ и $\Delta \dot{p}(t)$ составляют $\Delta p_{\max} = 9 \cdot 10^6 \text{ Па}$; $\Delta \dot{p}_{\max} = 10^9 \text{ Па} \cdot \text{c}^{-1}$. При таком различии значений переменных состояния значительно усложняется как задача выбора варьируемых параметров алгоритма (2), так и задача выбора весовых коэффициентов β_1 и β_2 аддитивного функционала (3), что связано с высокими вычислительными погрешностями решения задачи параметрического синтеза, вследствие плохой обусловленности матриц, используемых алгоритмом решения задачи синтеза. В этой связи варьируемые параметры алгоритма (2) k_ϕ и $k_{\dot{\phi}}$ предлагается выбирать с использованием разработанного алгоритма параметрического синтеза, а варьируемые параметры k_p и $k_{\dot{p}}$ – исходя из требования минимальных значений коэффициентов ошибок замкнутой системы стабилизации.

Структурную схему замкнутой инвариантной системы стабилизации танковой пушки, представленную на рис. 1, преобразуем к виду на рис. 2, где передаточные функции $\bar{W}_{\text{ЭГУ}}(s)$ и $\bar{W}_{\text{ЭБ}}(s)$ равны

$$\bar{W}_{\text{ЭГУ}}(s) = \frac{k_y}{T_1^2 s^2 + (T_2 + k_p k_y) s + 1 + k_p k_y};$$

$$\bar{W}_{\text{ЭБ}}(s) = k_\phi + k_{\dot{\phi}} s.$$

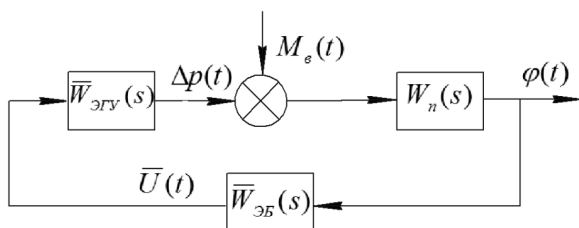


Рис. 2. Приведенная структурная схема замкнутой системы стабилизации

Тогда передаточная функция разомкнутой системы стабилизации $W_p(s)$ и характеристический полином замкнутой системы $A(s)$ записывается как:

$$W_p(s) = W_n(s) \cdot \bar{W}_{\text{ЭГУ}}(s) \cdot \bar{W}_{\text{ЭБ}}(s) = \frac{k_y k_n (k_\phi + k_{\dot{\phi}} s)}{s^2 [T_1^2 s^2 + (T_2 + k_p k_y) s + 1 + k_p k_y]}; \tag{4}$$

$$A(s) = T_1^4 s^4 + (T_2 + k_p k_y) s^3 + (1 + k_p k_y) s^2 + k_y k_n k_{\dot{\phi}} s + k_y k_n k_\phi. \tag{5}$$

Из рассмотрения соотношения (4) можно сделать вывод, что рассматриваемая система является системой с астатизмом второго порядка и, следовательно, инвариантной второго порядка, в которой первые два коэффициента ошибок равны нулю.

Порядок астатизма и порядок инвариантности системы может быть повышен, если положить, что

$$1 + k_p k_y = 0. \tag{6}$$

В этом случае передаточная функция разомкнутой системы (4) приобретает вид

$$W_p(s) = \frac{k_y k_n (k_\phi + k_{\dot{\phi}} s)}{s^3 (T_1^2 s + T_2 + k_p k_y)}, \tag{7}$$

а порядок астатизма и порядок инвариантности такой системы равен трем.

Если предположить, что

$$T_2 + k_p k_y = 0, \tag{8}$$

то система приобретает порядок астатизма и порядок инвариантности равным четырем, что доставляет ей абсолютную инвариантность к действию внешнего возмущения $M_b(t)$. В то же время выполнение соотношения (6) выводит замкнутую систему стабилизации на границу области устойчивости, обращая в нуль третий член характеристического полинома (5). Выполнение же соотношений (6) и (8) выводит замкнутую систему стабилизации из области устойчивости, обращая одновременно в нуль второй и третий член характеристического полинома (5).

Таким образом, между свойством инвариантности и устойчивостью системы существует противоречие, которое устраняется с помощью компромисса между порядком инвариантности и запасом устойчивости замкнутой системы.

Повысим порядок инвариантности замкнутой системы на единицу, выбрав значение варьируемого параметра k_p в соответствии с (6) равным

$$k_p^* = -\frac{1}{k_y}, \tag{9}$$

а значение варьируемого параметра $k_{\dot{p}}$ положим равным нулю.

Пусть значения конструктивных параметров системы составляют:

$$I_n = 736.9 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2;$$

$$k_M = 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Па}^{-1};$$

$$T_1 = 0.01 \text{ с};$$

$$T_2 = 0.5 \cdot 10^{-2} \text{ с};$$

$$k_y = -1,238 \cdot 10^6 \text{ В}^{-1} \cdot \text{Па}.$$

Тогда, выбранное в соответствии с (9) значение варьируемого параметра k_p составляет

$$k_p = 0,736 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1}.$$

Внешнее возмущение, действующее на танковую пушку, зададим в виде, представленном на рис. 3.

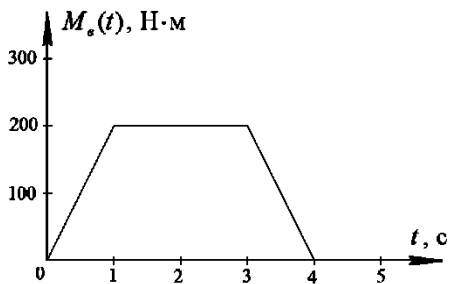


Рис. 3. Внешнее возмущение $M_B(t)$

Начальные условия системы дифференциальных уравнений (1) зададим равными $\phi(0) = 0,5$ рад; $\dot{\phi}(0) = 0$; $\Delta p(0) = 0$; $\Delta \dot{p}(0) = 0$.

Используя изложенный в [5] алгоритм параметрического синтеза, получаем оптимальные значения варьируемых параметров k_ϕ и $k_{\dot{\phi}}$

$$k_\phi^* = 249 \text{ В}; \quad k_{\dot{\phi}}^* = 125 \text{ В} \cdot \text{с}. \quad (10)$$

На рис. 4 приведена зависимость функционала (3) от значения варьируемого параметра k_p при $k_\phi = k_\phi^*$, $k_{\dot{\phi}} = k_{\dot{\phi}}^*$, $k_p = 0$.

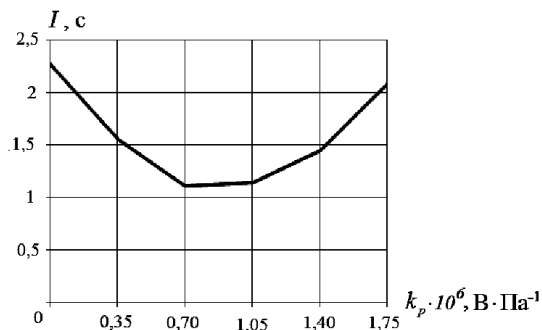
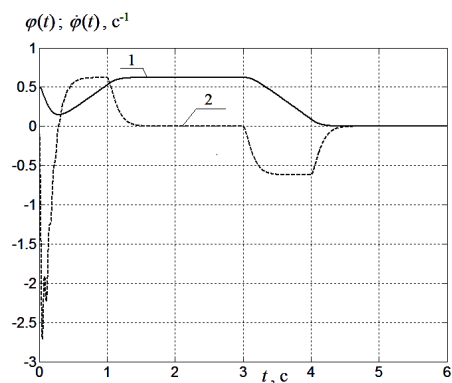


Рис. 4. Зависимость функционала (3) от значения коэффициента k_p .

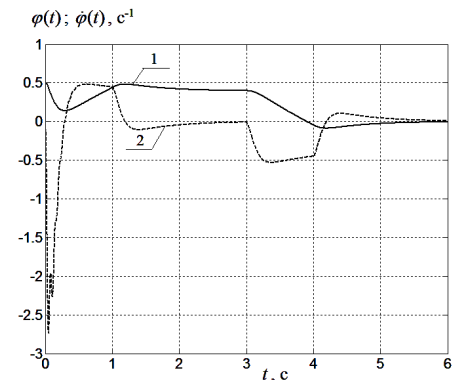
При возрастании значения варьируемого параметра k_p от нуля до k_p^* значение функционала (3)

уменьшается, а при $k_p = k_p^*$ становится минимальным. В тоже время при $k_p = k_p^*$ замкнутая система стабилизации выходит на границу области устойчивости. При $k_p > k_p^*$ возрастание функционала (3) происходит вследствие выхода замкнутой системы за пределы области устойчивости.

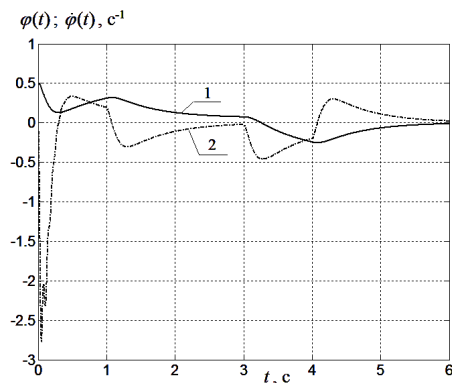
На рис. 5 приведены процессы наведения и стабилизации танковой пушки при различных значениях варьируемого параметра k_p . Анализ этих процессов подтверждает известный вывод о том, что повышение порядка астатизма приводит к улучшению процессов отработки внешних возмущений, действующих на объект стабилизации.



а - $k_p = 0$



б - $k_p = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1}$



в - $k_p = 0,736 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1}$

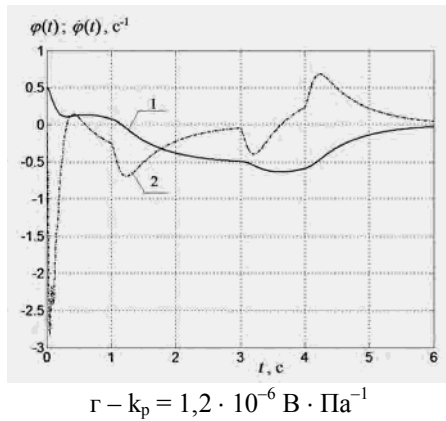


Рис. 5. Процеси обробки зовнішнього возмущення:

1 - $\phi(t)$; 2 - $\dot{\phi}(t)$

Если еще более повысить порядок астатизма системы и помимо условия (6) предположить, что выполняется условие (8), из которого следует

$$k_{\dot{p}} = -\frac{T_2}{k_y},$$

то такая идеально инвариантная система является полностью неработоспособной, вследствие потери ею устойчивости. В схеме, представленной на рис. 1, обратную связь по скорости измерения разности давления рабочей жидкости в полостях исполнительного гидроцилиндра $\Delta \dot{p}(t)$ вводит нецелесообразно. Действительно, при

$$k_{\phi} = k_{\phi}^* = 249 \text{ В}; \quad k_{\dot{\phi}} = k_{\dot{\phi}}^* = 125 \text{ В} \cdot \text{с};$$

$$k_p = k_p^* = 0,736 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1}$$

зависимость функционала (3) от значения варьируемого параметра k_p приведена на рис. 6.

Минимальное значение этот функционал достигает при $k_p = 0$.

Выводы

Требование инвариантности системы к действию внешних возмущений вступает в противоречие с требованием устойчивости системы. Это противо-

речие разрешается путем компромисса между выбором порядка инвариантности системы и её степенью устойчивости.

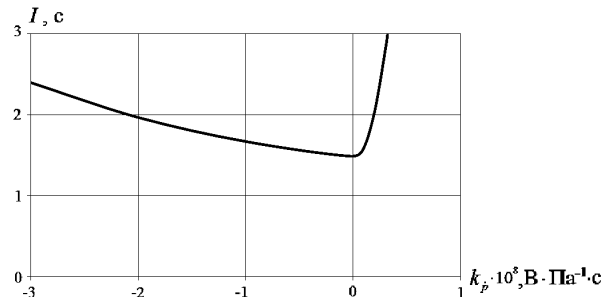


Рис. 6. Зависимость функционала (3)

от варьируемого параметра k_p .

Список литературы

1. Пат. UA 83903 від 10.10.2013, Україна, МПК F41G 5/00 Стабілізатор танкової гармати. / Александрова Т.С., Лазаренко А.О НТУ "ХПИ". Заявка № 201300690 від 21.01.2013. Опубл. 10.10.2013. Бюл. №19.
2. Александрова Т.Е. Цифровой инвариантный стабилизатор танковой пушки / Т.Е. Александрова, И.Е. Александрова, А.А. Лазаренко // Интегровані технології та енергозбереження. – 2012. – № 2. – С.18-20.
3. Александрова Т.Е. Параметрический синтез инвариантного стабилизатора танковой пушки / Т.Е. Александрова, А.А. Лазаренко // Интегровані технології та енергозбереження. – 2013. – № 2. – С.44-46.
4. Александрова Т.Е. К вопросу синтеза линейных систем стабилизации / Т.Е. Александрова // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – X. : НТУ "ХПИ". – 2013. – № 62 (1035). – С. 152-158.
5. Александрова Т.Е. Параметрический синтез оптимального стабилизатора танковой пушки / Т.Е. Александрова, А.Е. Истомин, И.В. Костяник // Механіка та машинобудування. – 2012. – № 2. – С. 203-210.

Поступила в редколлегию 30.09.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.М. Порошин, Национальный технический университет "ХПИ", Харьков.

ПРО ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ІНВАНІАНТНОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ ТАНКОВОЇ ГАРМАТИ

Т.Є. Александрова, А.А. Лазаренко, А.В. Зейн

Пропонується методика параметричного синтезу системи наведення і стабілізації танкової гармати, що заснована на компромісі між вимогами інваріантності до зовнішніх збурень і стійкості.

Ключеві слова: танкова гармата, система наведення і стабілізації, інваріантність до зовнішніх збурень, стійкість.

ABOUT THE FEATURES OF CONSTRUCTION OF THE INVARIANT SYSTEM OF GUIDANCE AND STABILIZATION OF TANK GUN

T.Ye. Aleksandrova, A.A. Lazarenko, A.V. Zeyn

The method of parametric synthesis of guidance and stabilization tank gun, based on compromise between the requirements of invariance to external perturbations and stability.

Keywords: tank gun, system guidance and stabilization, invariance to external perturbations, stability.