

УДК 519.81:681.51

М.Д. БОРИСЮК, член-кор. НАНУ (ХКБМ им. А.А. Морозова, г. Харьков);
А.С. КУЦЕНКО, д-р техн. наук (НТУ «ХПИ», г. Харьков);
Т.Е. АЛЕКСАНДРОВА, канд. техн. наук (НТУ «ХПИ», г. Харьков);
А.С. МАЗМАНИШВИЛИ, д-р ф.-м. наук (ННЦ «ХФТИ», г. Харьков)

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СТАБИЛИЗАТОРА УПРУГОЙ ТАНКОВОЙ ПУШКИ (Часть II. Параметрический синтез и сравнительный анализ стабилизаторов различной структуры)

Рассмотрены задачи параметрического синтеза стабилизаторов танковой пушки различной структуры (штатный ПД-стабилизатор, инвариантный стабилизатор, стабилизатор переменной структуры), а также проводится сравнительный анализ синтезированных стабилизаторов.

Розглянуто задачі параметричного синтезу стабілізаторів танкової гармати різної структури (штатний ПД-стабілізатор, інваріантний стабілізатор, стабілізатор змінної структури), а також проведено порівняльний аналіз синтезованих стабілізаторів.

3. Постановка и решение проблемы параметрического синтеза стабилизатора танковой пушки. Качество системы наведения и стабилизации танковой пушки будем оценивать с помощью интегрального квадратичного функционала

$$J(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = M \int_0^T [\beta_1^2 \varphi_j^2(t) + \beta_2^2 \dot{\varphi}_j^2(t)] dt = \beta_1^2 M \int_0^T \varphi_j^2(t) dt + \beta_2^2 M \int_0^T \dot{\varphi}_j^2(t) dt, \quad (29)$$

вычисленного решениями замкнутой системы (23)–(28), где M – символ математического ожидания реализаций двумерного «белого шума» $v_j(x, y)$, ($j = 1, N$); β_1, β_2 – весовые коэффициенты функционала (29), подлежащие выбору. В (29) через $\varphi_j(t)$ и $\dot{\varphi}_j(t)$ обозначены конкретные реализации случайных функций $\varphi(t)$ и $\dot{\varphi}(t)$, имеющие место при j -той реализации двумерного «белого шума» $v_j(x, y)$, ($j = 1, N$).

Введем частные функционалы:

$$J_1(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = M \int_0^T \varphi_j^2(t) dt; \quad (30)$$

$$J_2(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = M \int_0^T \dot{\varphi}_j^2(t) dt.$$

Случайные функции $\varphi(t)$ и $\dot{\varphi}(t)$ имеют разные размерности, поэтому разные размерности имеют и частные функционалы (30) и весовые коэффициенты β_1 и β_2 . Рассмотрим нормированные функционалы [9, 10]:

$$\bar{J}_1(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = \frac{1}{\Phi_{\max}^2} M \int_0^T \varphi_j^2(t) dt;$$

$$\bar{J}_2(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = \frac{1}{\Phi_{\max}^2} M \int_0^T \dot{\varphi}_j^2(t) dt \quad (31)$$

и нормированные весовые коэффициенты:

$$\bar{\beta}_1 = \Phi_{\max} \beta_1; \quad \bar{\beta}_2 = \dot{\Phi}_{\max} \beta_2, \quad (32)$$

где Φ_{\max} и $\dot{\Phi}_{\max}$ – максимально возможные значения случайных функций $\varphi(t)$ и $\dot{\varphi}(t)$.

Тогда аддитивный функционал (29) примет следующий вид:

$$J(k_\phi, k_\phi) = \beta_1^2 \bar{J}_1(k_\phi, k_\phi) + \beta_2^2 \bar{J}_2(k_\phi, k_\phi). \quad (33)$$

Нормированные функционалы (31) имеют одинаковые размерности, а нормированные весовые коэффициенты (32) — безразмерны.

При фиксированных значениях весовых коэффициентов $\bar{\beta}_1$ и $\bar{\beta}_2$ минимально возможное значение функционала (33) составляет

$$J^*(\bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2) = \beta_1^2 \bar{J}_1^* + \beta_2^2 \bar{J}_2^*, \quad (34)$$

где \bar{J}_1^* и \bar{J}_2^* — минимальные значения частных функционалов (31), полученные в результате решения задач минимизации каждого из них в отдельности.

На значения весовых коэффициентов $\bar{\beta}_1$ и $\bar{\beta}_2$ наложим ограничение

$$\bar{\beta}_1 = \bar{\beta}_2 = 1 \quad (35)$$

и поставим задачу минимизации функции (34) при ограничении (35). Для решения сформулированной задачи на условный экстремум составим функцию Лагранжа

$$F(\bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2) = \beta_1^2 \bar{J}_1^* + \beta_2^2 \bar{J}_2^* + \lambda(1 - \bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_2), \quad (36)$$

где λ — множитель Лагранжа.

Условия минимума функции (36) записываются в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2)}{\partial \bar{\beta}_1} &= 2\bar{\beta}_1 \bar{J}_1^* - \lambda = 0; \\ \frac{\partial F(\bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2)}{\partial \bar{\beta}_2} &= 2\bar{\beta}_2 \bar{J}_2^* - \lambda = 0. \end{aligned} \quad (37)$$

Из соотношений (37) мы имеем:

$$\bar{\beta}_1 = \frac{\lambda}{2\bar{J}_1^*}; \quad \bar{\beta}_2 = \frac{\lambda}{2\bar{J}_2^*}. \quad (38)$$

Подставляя (38) в соотношение (35), получаем:

$$\lambda = \frac{2}{\frac{1}{\bar{J}_1^*} + \frac{1}{\bar{J}_2^*}}. \quad (39)$$

С учетом (39) соотношения (38) приобретают вид:

$$\bar{\beta}_1 = \frac{1}{\bar{J}_1^* \left(\frac{1}{\bar{J}_1^*} + \frac{1}{\bar{J}_2^*} \right)}; \quad \bar{\beta}_2 = \frac{1}{\bar{J}_2^* \left(\frac{1}{\bar{J}_1^*} + \frac{1}{\bar{J}_2^*} \right)}. \quad (40)$$

В соотношения (40) подставим формулы (31), (32). В результате получаем формулы для расчета весовых коэффициентов аддитивного функционала (29):

$$\beta_1 = \frac{\Phi_{\max}}{J_1^* \left(\frac{\Phi_{\max}^2}{J_1^*} + \frac{\Phi_{\max}^2}{J_2^*} \right)}; \quad \beta_2 = \frac{\Phi_{\max}}{J_2^* \left(\frac{\Phi_{\max}^2}{J_1^*} + \frac{\Phi_{\max}^2}{J_2^*} \right)}. \quad (41)$$

Алгоритм минимизации по k_ϕ и k_ϕ частных функционалов

$$\begin{aligned} J_1(k_\phi, k_\phi) &= M \int_0^T \varphi^2(t) dt; \\ J_2(k_\phi, k_\phi) &= M \int_0^T \dot{\varphi}^2(t) dt \end{aligned} \quad (42)$$

и аддитивного функционала (29) может быть представлен в виде структурно-логической схемы, приведенной на рис. 5.

Алгоритм представляет собой совокупность четырех последовательных вычислительных блоков. Блок A_1 представляет собой генератор нормального марковского двумерного поля $H(x, y)$. На вход блока A_1 поступает информация о типе грунта (асфальтобетон, мостовая, грунтовая дорога, слабопересеченная, среднепересеченная или сильнопересеченная местность), а также реализации единичного двумерного «белого шума» $v_j(x, y)$, ($j = 1, N$). На выходе блока A_1 имеют место реализации $h_j(x, y)$, ($j = 1, N$) нормального двумерного поля $H(x, y)$. В произвольной точке этого поля (x^*, y^*) значение функции $h_j(x^*, y^*)$ представляет собой высоту неровности моделируемой поверхности движения в этой точке.

Блок A_2 реализует математическую модель вынужденных колебаний подрессоренной части корпуса танка при движении его по случайной поверхности $H(x, y)$. На вход блока A_2 поступают реализации функции $h_j(x, y)$, ($j = 1, N$), а также информация о текущих параметрах движения танка, а именно, скорости движения центра масс $v(t)$ и угловой скорости поворота корпуса $\dot{\psi}(t)$, в соответствии с которой вычисляются текущие координаты центра масс танка $x(t)$ и $y(t)$. Кроме того, на вход блока A_2 поступает информация о значениях массовых, инерционных, геометрических и других параметров системы подрессоривания танка, определяющих математическую модель возмущенного движения подрессоренной части корпуса. На выходе блока A_2 имеют место

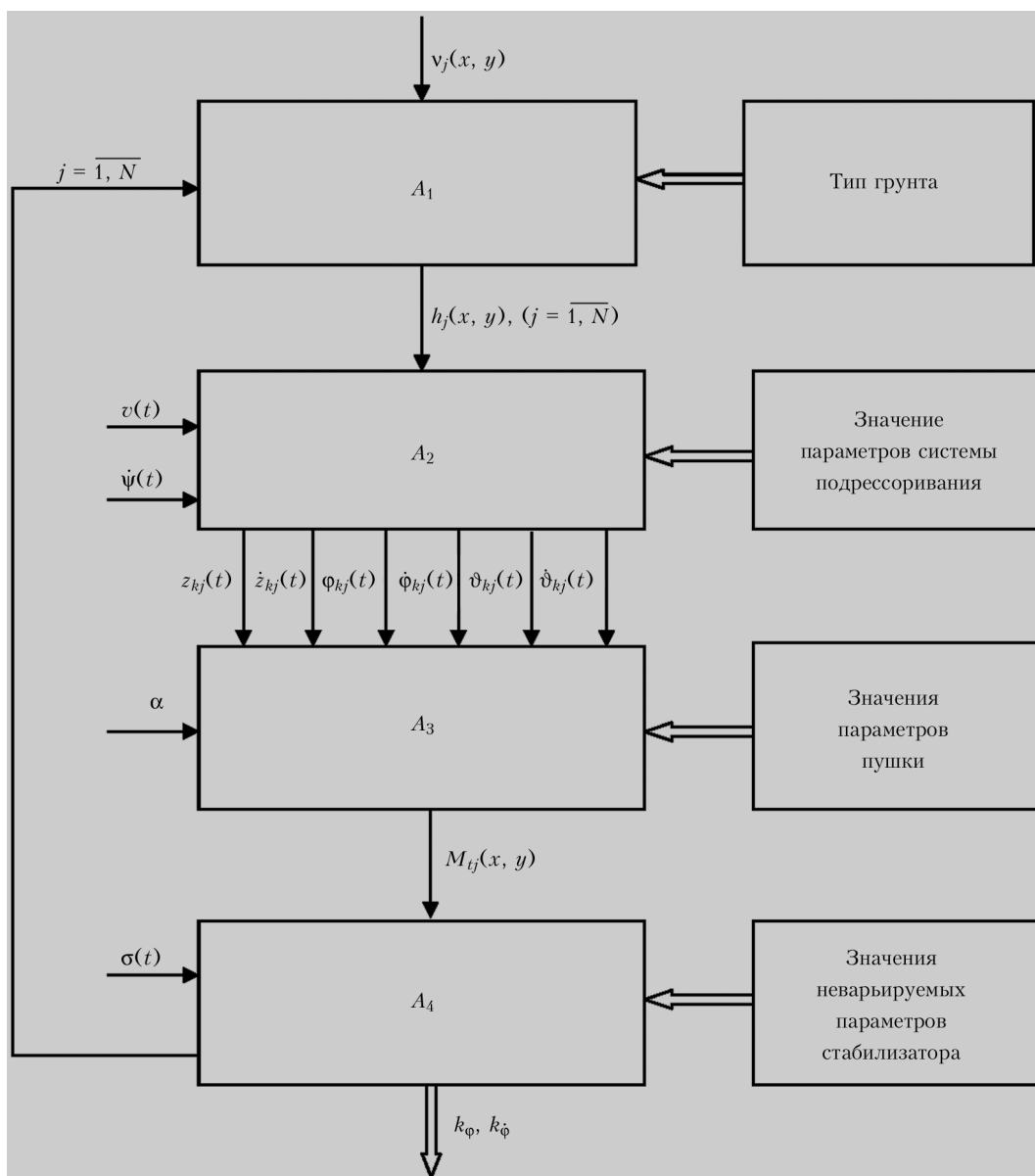


Рис. 5. Структурно-логическая схема алгоритма решения задачи параметрического синтеза

реализации случайных функций, характеризующих случайные вынужденные колебания поддресоренной части корпуса танка $z_{kj}(t)$, $\dot{z}_{kj}(t)$, $\varphi_{kj}(t)$, $\bar{\varphi}_{kj}(t)$; $\vartheta_{kj}(t)$, $\bar{\vartheta}_{kj}(t)$; ($j = 1, N$). Эти реализации поступают на вход блока A_3 , реализующего алгоритм вычисления момента внешнего возмущения $M_{tj}(t)$, ($j = 1, N$) с использованием изложенной выше математической модели возмущенного движения упругой танковой пушки.

С выхода блока A_3 реализации момента внешнего возмущения $M_{tj}(t)$, ($j = 1, N$) поступают на вход блока A_4 , реализующего матема-

тическую модель замкнутой системы стабилизации (23–28), а также процедуру Minimize программного продукта MathCAD или процедуру Optimization Toolbox программного продукта MATLAB по отношению к частным функционалам (30), а затем, после вычисления весовых коэффициентов (41), и к аддитивному функционалу (29). В результате на выходе блока A_4 имеем значения варьируемых параметров закона стабилизации (24) k_φ^* и $k_{\dot{\varphi}}^*$, доставляющих минимум аддитивному функционалу (29). В качестве множества допустимых значений варьируемых параметров

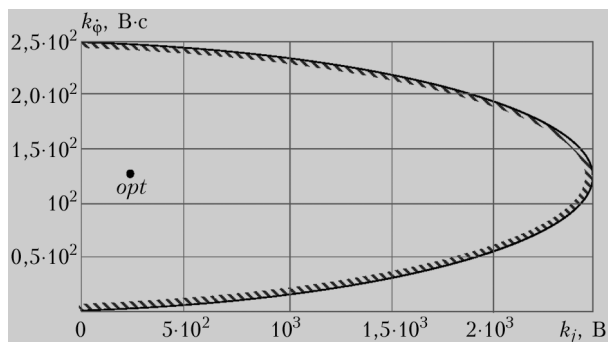


Рис. 6. Область устойчивости замкнутой системы (24)–(28)

k_ϕ и k_j рекомендуется выбирать область устойчивости замкнутой системы стабилизации в пространстве варьируемых параметров алгоритма стабилизации [13].

Пускай значения коэффициентов математической модели замкнутой системы стабилизации (23)–(28) составляют: $J_g = 736,9 \text{ Н·м·с}^2$; $k_m = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н·м·Па}^{-1}$; $k_e = 10^3 \text{ Н·м·А}^{-1}$; $k_y = 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$; $c = 100 \text{ Н·м}$; $k_p = 1,228 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $k_v = 0,2 \text{ с}$; $T_1 = 10^{-2} \text{ с}$; $T_2 = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}$; $T_p = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}$; $\sigma^* = 0,01 \text{ В}$; $\sigma^{**} = 10 \text{ В}$. Область устойчивости такой системы, построенная в соответствии с методикой, изложенной в работе [11], приведена на рис. 6.

4. Сравнительный анализ различных типов стабилизаторов танковой пушки. Рассмотрим штатный пропорционально-дифференциальный стабилизатор танковой пушки, реализующий закон стабилизации (24). Использование приведенного выше алгоритма параметрического синтеза приводит к выводу о том, что оптимальные значения варьируемых параметров k_ϕ^* и k_j^* линейной функции управления (24) практически не изменяются

при движении танка по различным грунтам и с различными скоростями и составляют $k_\phi^* = 249 \text{ В}$ и $k_j^* = 125 \text{ В}$. При таких значениях варьируемых параметров процессы наведения и стабилизации приведены на рис. 7, а. Время наведения при начальном значении угла расхождения $\phi(0) = 0,5 \text{ рад}$ не превышает 1 с, максимальное значение угловой скорости в процессе наведения достигает $\dot{\phi}_{max} = 2,3 \text{ с}^{-1}$, а значение аддитивного функционала (29) при $\beta_1 = 0,33$ и $\beta_2 = 0,835$ составляет $J = 0,6475 \text{ с}$ в предположении, что танк движется по асфальтобетону.

В работе [12] предложена схема инвариантного стабилизатора танковой пушки, объединяющего два принципа управления (по отклонению и по возмущению) и реализующего линейный закон стабилизации в виде:

$$\sigma(t) = k_\phi \phi(t) + k_j K_v \dot{\phi}(t) + k_p \Delta p(t). \quad (43)$$

Алгоритм решения задачи параметрического синтеза приводит к следующим оптимальным значениям варьируемых параметров функции управления (43) $k_\phi^* = 249 \text{ В}$; $k_j^* = 125 \text{ В}$; $k_p^* = -0,3 \cdot 10^{-6} \text{ В·Па}^{-1}$. Анализ рис. 7, б, где представлены процессы наведения и стабилизации в замкнутой системе, позволяет сделать вывод, что при использовании закона стабилизации (43) время наведения сокращается до 0,75 с, а значение функционала (29) составляет $J = 0,6478 \text{ с}$ при движении танка по асфальтобетону.

Рассмотрим стабилизатор переменной структуры [13,14], реализующий закон стаби-

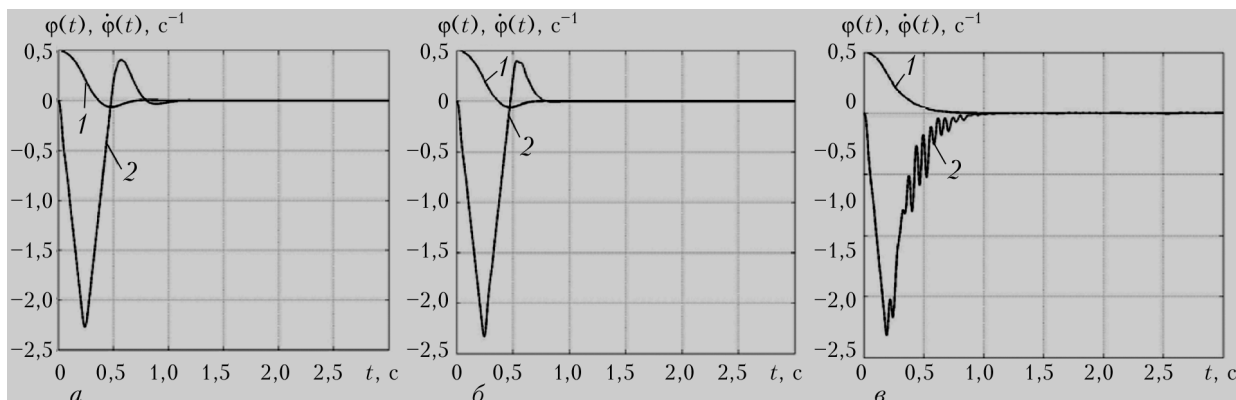


Рис. 7. Процессы наведения и стабилизации: а – штатный линейный стабилизатор; б – линейный инвариантный стабилизатор; в – стабилизатор переменной структуры

лизации (24), в котором параметры k_φ и $k_{\dot{\varphi}}$ выбираются в соответствии с соотношениями

$$k_\varphi = \bar{k}_\varphi \operatorname{sign} [\varphi(t)s(t)]; k_{\dot{\varphi}} = \bar{k}_{\dot{\varphi}} \operatorname{sign} [\dot{\varphi}(t)s(t)], \quad (44)$$

где $s(t)$ — поверхность скольжения, причем

$$s(t) = 6\dot{\varphi}(t) + \lambda\varphi(t). \quad (45)$$

В качестве варьируемых параметров замкнутой системы наведения и стабилизации с переменной структурой, выберем величины k_φ , $k_{\dot{\varphi}}$ и λ . Использование алгоритма параметрического синтеза приводит к следующим оптимальным значениям параметров $\bar{k}_\varphi^* = 150$ В; $\bar{k}_{\dot{\varphi}}^* = -36$ В; $\lambda = 5,54$ с⁻¹. Процессы наведения и стабилизации в замкнутой системе с переменной структурой приведены на рис. 7, в. Стабилизатор переменной структуры обеспечивает аperiodический характер процесса наведения. Быстродействие стабилизатора переменной структуры практически не отличается от быстродействия пропорционально-дифференциального стабилизатора (24) при оптимальных значениях варьируемых параметров k_φ и $k_{\dot{\varphi}}$, однако максимальное значение угловой скорости поворота пушки для стабилизатора переменной структуры не превышает величины $\dot{\varphi}_{\max} = 1,8$ с⁻¹, а значение функционала (29) при движении танка по асфальтобетону составляет $J = 0,3845$ с. Кроме того, скользящий режим работы стабилизатора доставляет ему свойство инвариантности к действию внешних возмущений, а также свойство робастности к случайным изменениям значений параметров объекта стабилизации и стабилизатора [15, 16].

После приведения оси канала ствола танковой пушки к линии прицеливания заканчивается режим наведения и начинается режим стабилизации оси канала ствола относительно линии прицеливания в условиях действия внешних возмущений, определяемых типом дорожного покрытия и скоростью движения танка. На рис. 8 приведены гистограммы угла рассогласования $\varphi(t)$, построенные при движении танка со скоростями 5 м·с⁻¹ и 10 м·с⁻¹ по различным дорожным покрытиям при использовании линейного стабилизатора (24).

Анализ этих гистограмм позволяет сделать вывод, что ухудшение дорожного покрытия приводит к возрастанию амплитуд случайных колебаний ствола танковой пушки. Так, при движении по грунтовой дороге амплитуда стабилизированных колебаний может достигать значения 4 угловых градуса. Возрастание скорости движения танка от 5 м·с⁻¹ до 10 м·с⁻¹ приводит к уменьшению амплитуд стабилизируемых колебаний оси канала ствола. Это связано с тем, что в диапазоне скоростей наиболее интенсивно проявляются резонансные свойства танковой системы поддрессориования, следовательно, в этом диапазоне скоростей внешние возмущения, действующие на танковую пушку, достигают наивысших значений. Увеличение скорости движения танка до 10 м·с⁻¹ выводит систему поддрессориования из зоны резонанса и приводит к уменьшению внешних возмущений, действующих на танковую пушку.

Использование инвариантного стабилизатора (43) не приводит к значительному повышению точности стабилизации оси канала ствола относительно линии прицеливания. Гистограммы случайной функции $\varphi(t)$ для стабилизатора (43) практически не отличаются от гистограмм, приведенных на рис. 8.

На рис. 9 приведены гистограммы случайной функции $\varphi(t)$, построенные при движении танка со скоростями 5 м·с⁻¹ и 10 м·с⁻¹ по различным дорожным покрытиям при использовании стабилизатора переменной структуры (24), (44), (45). Анализ гистограмм приводит к выводу о том, что точность стабилизации оси канала ствола, обеспечиваемая стабилизатором переменной структуры ниже, чем при использовании линейных стабилизаторов (24) и (43). Поэтому в системах наведения и стабилизации танковой пушки алгоритм переменной структуры (24), (44), (45) или (43), (44), (45) целесообразно использовать только в процессе наведения оси канала ствола на цель, где этот алгоритм обеспечивает скользящий режим работы системы и необходимое качество процессов наведения. В режиме стабилизации целесообразно использование линейных алгоритмов (24) или (43), обеспечи-

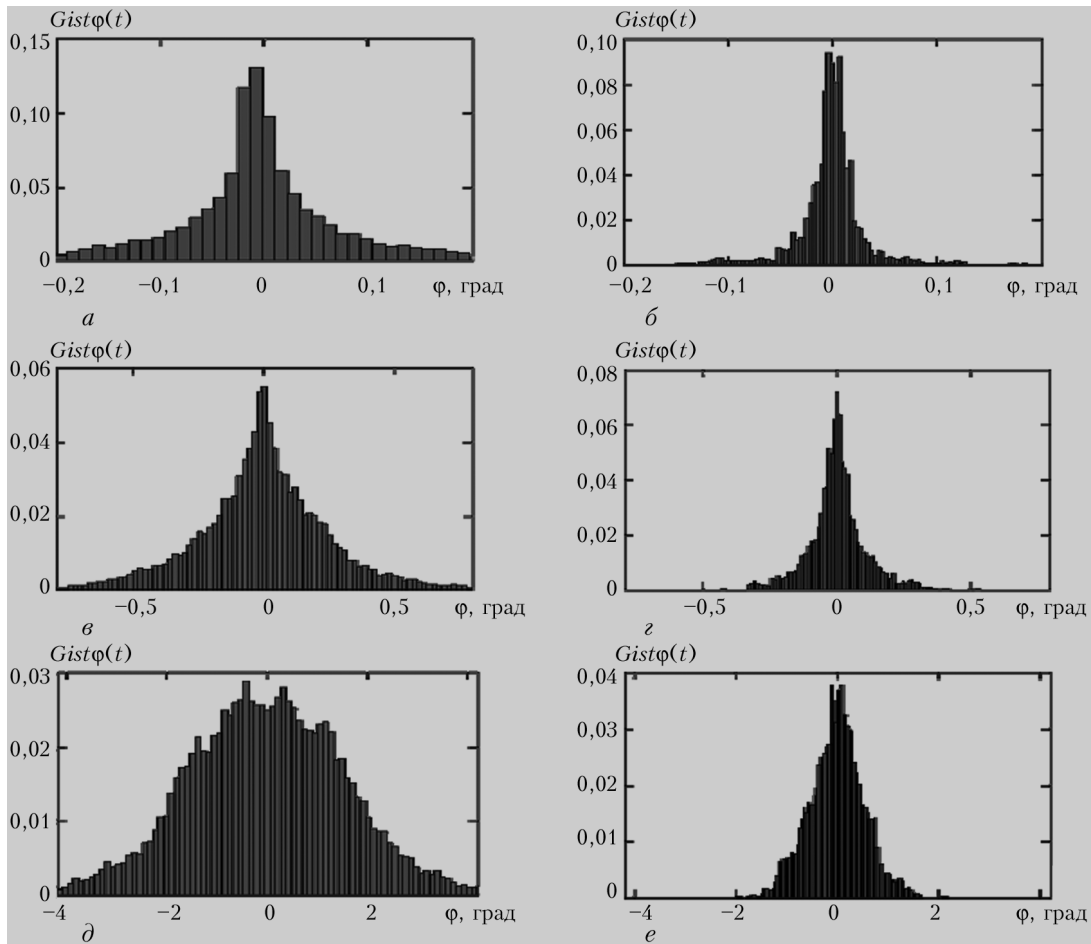


Рис. 8. Гистограммы угла рассогласования $\varphi(t)$ при использовании линейного стабилизатора (24): *a* – асфальтобетон; $V = 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; *б* – асфальтобетон; $V = 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; *в* – мостовая, $V = 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; *г* – мостовая, $V = 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; *д* – грунтовая дорога, $V = 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; *е* – грунтовая дорога, $V = 0 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$

вающих более высокую точность стабилизации.

Огонь из танковой пушки осуществляется в условиях прямой видимости цели. При прицельном выстреле допустимо угловое рассогласование оси канала ствола от линии прицеливания не должно превышать 20 угловых секунд или 0,0056 угловых градусов. Анализ приведенных гистограмм показывает, что достигнуть такой точности стабилизации не представляется возможным. В этой связи, для осуществления прицельного огня из танковой пушки с ходу, используется устройство разрешения выстрела, которое выдает на него разрешение при условии выполнения соотношения

$$|\varphi(t)| \leq \varphi^*, \quad (46)$$

где φ^* – разрешаемый угол отклонения оси канала ствола от линии прицеливания.

Использование в современных танковых системах управления огнем цифровых баллистических вычислителей позволяет использовать значительно более сложные чем (46) алгоритмы разрешения выстрела, включающие информацию об упругих колебаниях ствола. В районе дульного среза ствола танковой пушки предлагается установить отражатель лазерного луча танкового прицела-дальномера. При весьма малых упругих деформациях ствола танковой пушки лазерный луч прицела-дальномера попадает в поле зрения отражателя и выстрел разрешается только в случае нахождения лазерного луча в поле зрения отражателя. Однако это условие не является единственным, а только необходимым для производства выстрела. Помимо условия на-

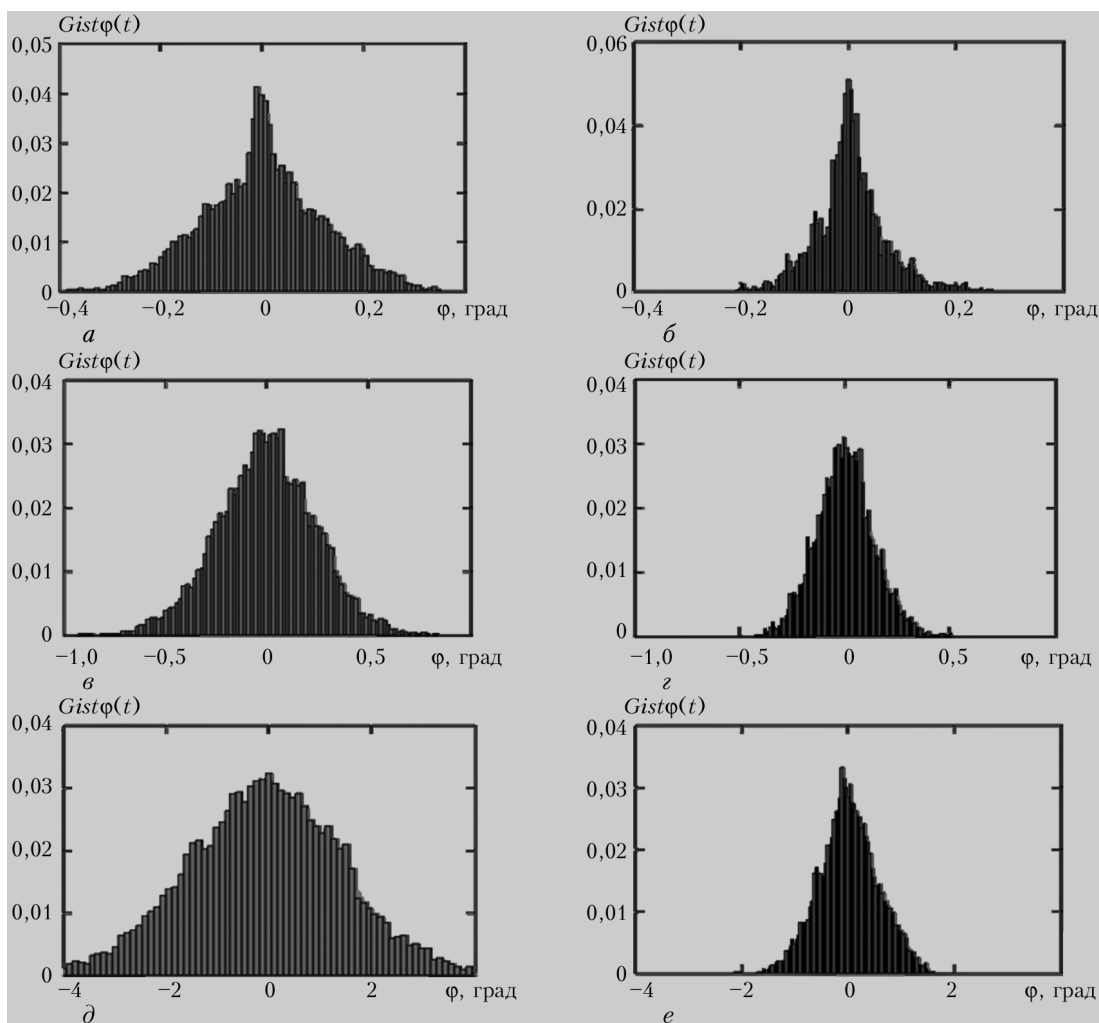


Рис. 9. Гистограммы случайной функции $\phi(t)$ при использовании стабилизатора переменной структуры (24), (44), (45): *a* – асфальтобетон; $V = 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; *б* – асфальтобетон; $V = 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; *в* – мостовая; $V = 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; *г* – мостовая; $V = 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; *д* – грунтовая дорога, $V = 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; *е* – грунтовая дорога, $V = 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$

хождения лазерного луча в поле зрения отражателя должно выполняться условие (46) при определенных знаках угловых скоростей поворота танковой пушки $\omega_\phi(t)$ относительно оси цапф. Блок-схема алгоритма, реализуемого устройством разрешения выстрела, приведена на рис. 10.

Если лазерный луч прицела-дальномера попадает в отражатель, то выполняется условие

$$\vec{r} \in G_r, \tag{47}$$

где \vec{r} – радиус-вектор точки падения лазерного луча на поверхность отражателя; G_r – множество возможных точек падения лазерного луча.

При выполнении зависимости (47) деформация ствола упругой танковой пушки близка к нулю, что является необходимым условием производства выстрела. Для его производства теперь достаточно выполнение условия $|\phi[nT]| \leq \phi^*$ а также неравенств:

$$\phi[nT] \geq 0; \quad \omega_\phi[nT] < 0, \tag{49}$$

или

$$\phi[nT] < 0; \quad \omega_\phi[nT] > 0, \tag{50}$$

где T – период квантования цифрового вычислителя.

Если условия (47)–(50) выполняются, то выстрел разрешен, если хотя бы одно из этих

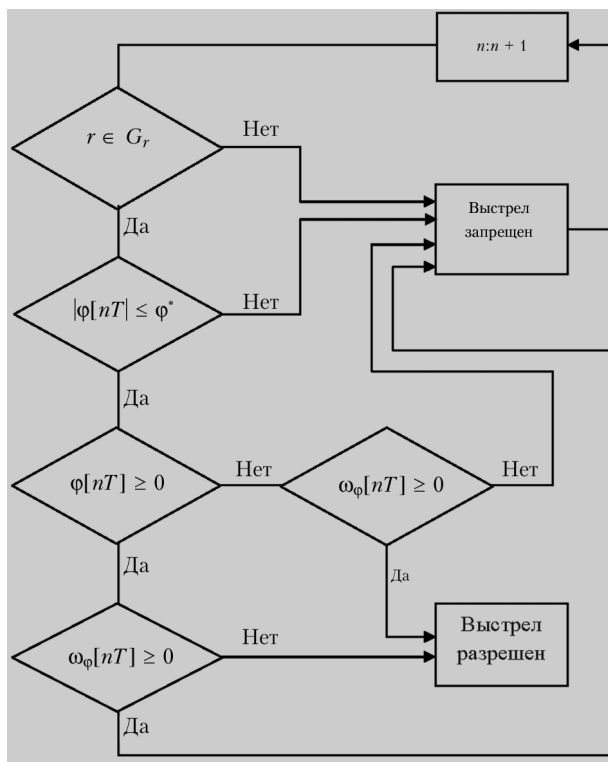


Рис. 10. Блок-схема алгоритма разрешения выстрела

условий не выполняется, то производство выстрела запрещается.

Выводы

Интегральный квадратичный аддитивный функционал, используемый для оценки точности наведения и стабилизации оси канала ствола танковой пушки относительно линии прицеливания, имеет единственный минимум в области допустимых значений варьируемых параметров стабилизатора.

Сравнительный анализ пропорционально-дифференциального, инвариантного стабилизаторов и стабилизатора переменной структуры показывает, что наилучшее качество процессов наведения обеспечивает стабилизатор переменной структуры, который при реализации скользящего режима доставляет замкнутой системе наведения высокую точность, свойство инвариантности к действию внешних возмущений и свойство робастности к случайным изменениям параметров объекта стабилизации и стабилизатора.

Наименьшая точность стабилизации оси канала ствола танковой пушки относительно

линии прицеливания имеет место при скорости движения танка $4\div 6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, когда в наибольшей степени проявляются резонансные свойства танковой системы подрессоривания. Система наведения и стабилизации танковой пушки с переменной структурой обеспечивает высокое качество процессов наведения, однако такая система не обеспечивает высокой точности стабилизации оси канала ствола относительно линии прицеливания по сравнению с линейными системами стабилизации. В этой связи в режиме наведения целесообразно использовать алгоритм наведения переменной структуры, а в режиме стабилизации — линейный.

Высокая точность стрельбы из танковой пушки может быть достигнута только с использованием цифрового устройства разрешения выстрела, с помощью которого выстрел разрешается только при малых деформациях упругого ствола танковой пушки и при выполнении системы неравенств относительно текущих значений углов рассогласования и угловых скоростей поворота танковой пушки.

Список литературы к части II

- Александрова Т.Е. К задаче параметрического синтеза динамических систем // Автоматизация производственных процессов. — 2001. — № 2. — С. 139–140.
- Александров Е.Е., Александрова Т.Е. Выбор оптимизируемого функционала в задачах параметрического синтеза систем стабилизации // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2004. — № 2. — С. 23–26.
- Александрова Т.Е., Костяник И.В. Построение областей устойчивости сложных систем в плоскости варьируемых параметров // Колесные и гусеничные машины специального назначения. Вестник Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт». — Харьков: НТУ «ХПИ». — 2003. — Вып. 28. — С. 23–28.
- Александрова Т.Е., Александрова И.Е., Лазаренко А.А. Инвариантный стабилизатор танковой пушки // Интегровані технології та енергозбереження. — 2012. — № 2. — С. 18–20.
- Александров Е.Е., Александрова Т.Е., Никонов О.Я. Параметрический синтез системы с переменной структурой для наведения и стабилизации танковой пушки // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2008. — № 1. — С. 49–53.
- Мазанишвили А.С., Александрова Т.Е. Параметрический синтез стабилизатора переменной структуры // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПИ». — 2013. — № 18 (991). — С. 93–98.
- Барбашин Е.А. Введение в теорию устойчивости. — М.: Наука, 1967. — 224 с.
- Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. — М.: Наука, 1967. — 336 с.