

УДК 519.81:681.51

Борисюк М.Д., Александров Е.Е., Александрова Т.Е.

**К ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ ИНВАРИАНТНОГО СТАБИЛИЗАТОРА КАНАЛА  
ВЕРТИКАЛЬНОГО НАВЕДЕНИЯ ОСНОВНОГО ВООРУЖЕНИЯ ТАНКА**

Система наведения и стабилизации танковой пушки, являющейся основным вооружением танка, содержит два независимых канала – канал вертикального наведения, в котором поворот пушки осуществляется относительно оси цапф, и канал горизонтального наведения, в котором поворот пушки вместе с башней осуществляется относительно оси поворота башни. Танковая башня неуравновешена относительно ее оси поворота, в связи с тем, что эта ось не совпадает с главной центральной вертикальной осью инерции, проходящей через центр масс башни. При повороте танка возникает центробежная сила, приложенная к центру масс башни, вызывающая поворот башни относительно ее оси поворота и, следовательно, отклонение оси канала ствола относительно линии прицеливания. Для придания системе наведения и стабилизации свойства инвариантности к действию внешних возмущений в канал горизонтального наведения танковой пушки помимо гироскопических датчиков угла и угловой скорости введен также датчик линейных ускорений, ось чувствительности которого параллельна главной центральной боковой оси инерции танковой башни [1]. При входе танка в поворот к его неуравновешенной башне прикладывается момент возмущения

$$M_{\sigma\sigma}(t) = m_{\sigma} \cdot ha_y(t), \tag{1}$$

где  $m_{\sigma}$  – полная масса башни с пушкой;  $h$  – расстояние между осью поворота башни и ее главной центральной вертикальной осью инерции;  $a_y(t)$  – центробежное ускорение, измеренное датчиком линейных ускорений и определяемое формулой:

$$a_y(t) = \frac{v^2(t)}{R(t)}, \tag{2}$$

где  $v(t)$  – мгновенная скорость движения центра масс танка;  $R(t)$  – текущий радиус поворота.

Алгоритм стабилизации танковой пушки в канале горизонтального наведения имеет следующий вид

$$U_{\psi}(t) = k_{\psi}\psi(t) + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}(t) + k_a a_y(t), \tag{3}$$

где  $\psi(t)$  – угловое рассогласование оси канала ствола танковой пушки и линии прицеливания;  $\dot{\psi}(t)$  – угловая скорость поворота башни;  $k_{\psi}$ ,  $k_{\dot{\psi}}$  и  $k_a$  – варьируемые константы алгоритма (3).

Алгоритм стабилизации (3) реализует комбинацию двух известных принципов управления – принцип управления по отклонению, который реализуют два первых слагаемых правой части (3) и принцип управления по возмущению, который реализует третье слагаемое правой части (3). Такая комбинация доставляет замкнутой системе стабилизации свойство инвариантности к действию внешнего возмущения. Это объясняется тем, что сигнал на выходе датчика линейных ускорений  $a_y(t)$  появляется на входе системы стабилизации, реализующей алгоритм (3), еще до начала увода оси канала ствола от линии прицеливания, иными словами, до появления выходного сигнала  $\psi(t)$  гироскопического датчика угла и выходного сигнала  $\dot{\psi}(t)$  гироскопического датчика угловой скорости. Такая система начинает реагировать не на результат действия внешнего возмущения, а собственно на внешнее возмущение (1), что приводит к улучшению его обработки системой.

Танковая пушка уравновешена относительно оси цапф. Кроме того, прицельный огонь из основного вооружения танка ведется в пределах прямой видимости цели при малых углах возвышения пушки. При этом внешнее возмущение, действующее на танковую пушку в канале вертикального наведения при повороте танка, определяемое формулой

$$M_{\sigma\sigma}(t) = m_c l a_y(t) \sin \varphi_0(t), \tag{4}$$

считается малым вследствие малости текущего угла возвышения  $\varphi_0(t)$ . В (4) через  $m_c$  обозначена масса ствола танковой пушки, а через  $l$  – расстояние от оси цапф до центра тяжести ствола. Малость момента (4) объяснят отсутствие требования инвариантности к системе наведения и стабилизации танковой пушки в канале вертикального наведения.

Вместе с тем, при ведении танком боевых действий в горных районах угол возвышения танковой пушки может достигать значительных величин. В этом случае пропорционально-дифференциальный алгоритм стабилизации

$$U_\varphi(t) = k_\varphi \varphi(t) + k_{\dot{\varphi}} \dot{\varphi}(t), \quad (5)$$

реализуемый в канале вертикального наведения не обеспечивает требуемого качества обработки внешнего возмущения (4). Для повышения точности стабилизации оси канала ствола относительно линии прицеливания целесообразно в канале вертикального наведения танковой пушки обеспечить системе наведения и стабилизации свойство инвариантности к действию внешних возмущений

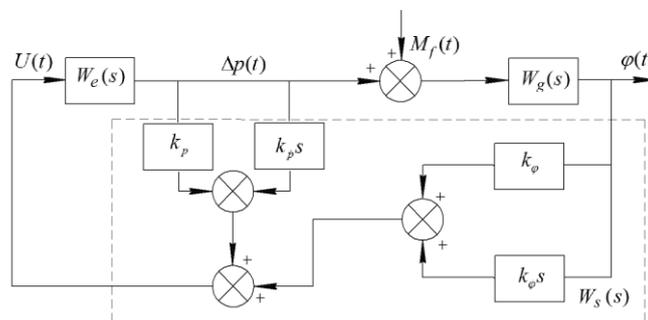


Рисунок 1 – Структурная схема замкнутой инвариантной системы наведения и стабилизации танковой пушки

В работе [2] авторами разработана структурная схема инвариантного стабилизатора канала вертикального наведения танковой пушки, представленная на рис. 1, где приняты обозначения:  $\varphi(t)$  – угловое рассогласование оси канала ствола и линии прицеливания;  $\beta(t)$  – угол поворота якоря электромагнита электрогидравлического усилителя;  $\Delta p(t)$  – разность давлений рабочей жидкости в полостях исполнительного гидроцилиндра;  $M_f(t)$  – внешнее возмущение, действующее на танковую пушку;  $U_\varphi(t)$  – выходной сигнал электронного блока стабилизации;  $k_\varphi$ ,  $k_{\dot{\varphi}}$ ,  $k_p$ ,  $k_{\dot{p}}$  – варьируемые параметры алгоритма стабилизации, формируемого электронным блоком стабилизатора

$$U_\varphi(t) = k_\varphi \varphi(t) + k_{\dot{\varphi}} \dot{\varphi}(t) + k_p \Delta p(t) + k_{\dot{p}} \dot{\Delta p}(t); \quad (6)$$

$W_e(s)$  – передаточная функция электрогидравлического усилителя (ЭГУ), являющегося исполнительным органом системы наведения и стабилизации в канале вертикального наведения;  $W_g(s)$  – передаточная функция танковой пушки;  $W_s(s)$  – передаточная функция электронного блока стабилизатора.

Внешнее возмущение (4), действующее на танковую пушку в канале вертикального наведения, приводит к изменению разности давлений рабочей жидкости в полостях исполнительного гидроцилиндра, поэтому третье и четвертое слагаемое в алгоритме (6) должны доставлять системе наведения и стабилизации свойство инвариантности к действию возмущения (4).

В работе [3] приведена математическая модель танковой пушки как объекта стабилизации с ЭГУ в канале вертикального наведения, которая записывается в виде системы дифференциальных уравнений

$$I_g \ddot{\varphi}(t) = k_m \Delta p(t) + M_f(t); \quad (7)$$

$$T_d \Delta \dot{p}(t) + \Delta p(t) = k_d \beta(t); \quad (8)$$

$$T_1^2 \ddot{\beta}(t) + T_2 \dot{\beta}(t) + \beta(t) = k_u U_\varphi(t), \quad (9)$$

где  $I_g$  – момент инерции пушки относительно оси цапф;  $T_d$  – постоянная времени гидравлической части ЭГУ;  $T_1, T_2$  – постоянные времени электрической части ЭГУ;  $k_m, k_d, k_u$  – коэффициенты пропорциональности.

Из системы дифференциальных уравнений (7)–(9) имеем:

$$W_e(s) = \frac{k_d k_u}{(T_d s + 1)(T_1^2 s^2 + T_2 s + 1)}; \quad W_g(s) = \frac{k_m}{I_g s^2}. \quad (10)$$

Точность стабилизации оси канала ствола танковой пушки будем оценивать величиной интегрального квадратичного функционала [3]

$$I = \int_0^T [\beta_1^2 \varphi^2(t) + \beta_2^2 \dot{\varphi}^2(t)] dt, \quad (11)$$

где  $\beta_1$ , и  $\beta_2$  – весовые коэффициенты, подлежащие выбору.

В работе [4] изложена методика решения задачи параметрического синтеза замкнутой системы стабилизации (7)–(9), (5), состоящей в отыскании значений варьируемых параметров  $k_\varphi$  и  $k_{\dot{\varphi}}$  алгоритма стабилизации (5), доставляющих на решениях замкнутой системы (7)–(9), (5) минимум аддитивному функционалу (11). Эта методика включает также выбор весовых коэффициентов функционала (11) в соответствии с материалами статьи [5]. В статье [6] показано, что решение сформулированной выше задачи параметрического синтеза единственно, иными словами, функционал (11) в области устойчивости замкнутой системы (7)–(9), (5) имеет единственный глобальный минимум и не имеет минимумов локальных, что значительно облегчает получение решения задачи параметрического синтеза с использованием программных продуктов Minimize пакета MathCAD или Optimization Toolbox пакета MatLAB. Однако использование изложенной в работе [4] методики встречает определенные трудности при решении задачи параметрического синтеза замкнутой инвариантной системы стабилизации (7)–(9), (6), которая включает помимо отыскания параметров  $k_\varphi$  и  $k_{\dot{\varphi}}$  также отыскание параметров  $k_p$  и  $k_{\dot{p}}$ . Эти трудности связаны с тем, что значения переменных состояния объекта стабилизации (7)–(9) весьма различны. Так переменные  $\varphi(t)$  и  $\dot{\varphi}(t)$  могут достигать значений  $\varphi_{\max} = 1$  рад;  $\dot{\varphi}_{\max} = 4$  с<sup>-1</sup>, переменные  $\beta(t)$  и  $\dot{\beta}(t)$  значений  $\beta_{\max} = 0,1$  рад;  $\dot{\beta}_{\max} = 1$  с<sup>-1</sup>, а переменные  $\Delta p(t)$  и  $\dot{\Delta p}(t)$  значений  $\Delta p_{\max} = 9 \cdot 10^6$  Па;  $\dot{\Delta p}_{\max} = 10^9$  Па·с<sup>-1</sup>. При этом матрицы, используемые программными продуктами Minimize или Optimization Toolbox, являются плохо обусловленными, что приводит к значительным погрешностям решения задачи параметрического синтеза в части отыскания варьируемых параметров  $k_p$  и  $k_{\dot{p}}$ .

В соответствии с вышеизложенным, в данной работе предлагается значения варьируемых параметров  $k_p$  и  $k_{\dot{p}}$  алгоритма (6) отыскивать из условия достижения максимального порядка инвариантности замкнутой системы стабилизации к действию внешних возмущений, а варьируемые параметры  $k_\varphi$  и  $k_{\dot{\varphi}}$  – из условия минимума функционала (11), вычисляемого на решениях замкнутой системы (7)–(9), (6) при выбранных значениях параметров  $k_p$  и  $k_{\dot{p}}$ .

В соотношениях (10) введем обозначения:

$$k_d k_u = k_y; \quad \frac{k_m}{I_g} = k_g.$$

Используя схему, представленную на рис. 1, запишем соотношения для передаточной функции разомкнутой системы и характеристического полинома замкнутой системы стабилизации:

$$W_r(s) = \frac{k_y k_g (k_\varphi + k_{\dot{\varphi}} s)}{s^2 [T_d T_1^2 s^3 + (T_1^2 + T_d T_2) s^2 + (T_d + T_2 + k_y k_{\dot{p}}) s + 1 + k_y k_p]}; \quad (12)$$

$$A(s) = T_d T_1^2 s^5 + (T_1^2 + T_d T_2) s^4 + (T_d + T_2 + k_y k_p) s^3 + (1 + k_y k_p) s^2 + k_y k_g k_{\dot{\varphi}} s + k_y k_g k_{\varphi}. \quad (13)$$

Из рассмотрения соотношения (12) можно сделать заключение о том, что порядок астатизма и порядок инвариантности системы стабилизации равен двум. Для повышения порядка инвариантности системы повысим порядок ее астатизма положив

$$1 + k_y k_p = 0. \quad (14)$$

При выполнении условия (14) передаточная функция разомкнутой системы принимает вид

$$W_e(s) = \frac{k_y k_g (k_{\varphi} + k_{\dot{\varphi}} s)}{s^3 [T_d T_1^2 s^2 + (T_1^2 + T_d T_2) s + T_d + T_2 + k_y k_p]}, \quad (15)$$

что свидетельствует о повышении порядка астатизма системы до трех.

Из условия (14) следует, что значение варьируемого коэффициента  $k_p$ , при котором происходит повышение порядка инвариантности системы, составляет

$$k_p = -\frac{1}{k_y}. \quad (16)$$

Зададим изменение по времени внешнего возмущения системы  $M_f(t)$  в виде, представленном на рис. 2, а значения конструктивных параметров объекта стабилизации (7)–(9) положим равными:  $J_g = 736,9 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ;  $k_m = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Па}^{-1}$ ;  $T_d = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ;  $k_d = -1,238 \cdot 10^7 \text{ Па}$ ;  $k_u = 10^{-1} \text{ В}^{-1}$ ;  $T_1 = 0,01 \text{ с}$ ;  $T_2 = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ .

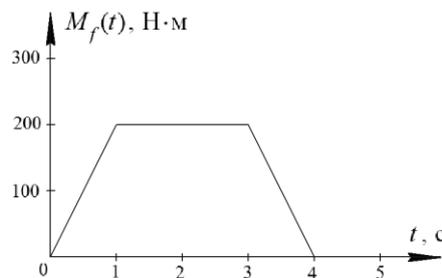


Рисунок 2 – Внешнее возмущение  $M_f(t)$

Значения варьируемых параметров  $k_p$  и  $k_{\dot{p}}$  алгоритма (6) положим равными нулю, а значения параметров  $k_{\varphi}$  и  $k_{\dot{\varphi}}$  получим с помощью использования методики решения задачи параметрического синтеза, изложенной в работе [4]. При этом полученные оптимальные значения варьируемых параметров  $k_{\varphi}$  и  $k_{\dot{\varphi}}$ , доставляющие минимум функционалу (11), составляют  $k_{\varphi}^* = 249 \text{ В}$ ;  $k_{\dot{\varphi}}^* = 125 \text{ В} \cdot \text{с}$ . Минимальное значение функционала (11) при полученных оптимальных значениях варьируемых параметров  $k_{\varphi}$  и  $k_{\dot{\varphi}}$  составляет  $J^* = 2,24$ .

Затем, полагая равным нулю значение варьируемого параметра  $k_{\dot{p}}$ , будем изменять значение параметра  $k_p$  и вычислять при этом значение функционала (11), зависимость которого от значений параметра  $k_p$  приведена на рис. 3.

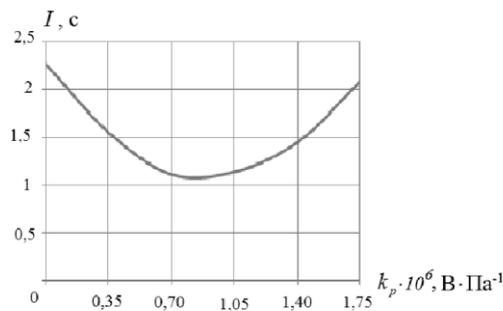


Рисунок 3 – Зависимость функционала (11) от значения коэффициента  $k_p$

Из анализа рис. 3 можно сделать заключение, что минимум функционала (11) достигается при значении варьируемого параметра  $k_p$ , определяемом формулой (16), а именно  $k_p^* = 0,736 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1}$ .

Вместе с тем, выполнение условия (14) приводит к обращению в нуль коэффициента при четвертом слагаемом характеристического полинома замкнутой системы (13), что соответствует выходу замкнутой системы на границу области устойчивости. Возрастание значения функционала при  $k_p > k_p^*$  происходит вследствие выхода замкнутой системы за пределы области устойчивости. Таким образом между свойством инвариантности к действию внешних возмущений и устойчивостью системы существует противоречие, устранение которого возможно с помощью компромисса между порядком инвариантности и запасом устойчивости замкнутой системы. Так, значение варьируемого параметра  $k_p$  следует выбирать в интервале

$$0 < k_p \leq k_p^*. \quad (17)$$

На рис. 4 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 инвариантности системы приводит к улучшению процессов обработки внешних возмущений, действующих на объект стабилизации.

Если еще более повысить порядок астатизма системы и помимо условия (14) положить

$$T_d + T_2 + k_y k_p = 0, \quad (18)$$

то передаточная функция разомкнутой системы принимает вид

$$W_r(s) = \frac{k_y k_g (k_\phi + k_\phi s)}{s^4 (T_d T_1^2 s + T_1^2 + T_d T_2)}$$

При этом порядок астатизма системы повышается до четырех и замкнутая система становится абсолютно инвариантной к действию внешних возмущений. В то же время система полностью теряет устойчивость в связи с тем, что выполнение условий (14) и (18) приводит к выходу системы за пределы области устойчивости вследствие равенства нулю коэффициентов при третьем и четвертом членах характеристического полинома.

Положим в алгоритме (6) значения варьируемых параметров равными  $k_\phi = k_\phi^*$ ;  $k_\phi = k_\phi^*$ ;  $k_p = k_p^*$  и построим зависимость функционала (11), вычисленного на решениях замкнутой системы (7)–(9), (6) при различных значениях варьируемого параметра  $k_p$ . Такая зависимость приведена на рис. 5, из рассмотрения которой можно заключить, что минимум функционала (11) достигается при  $k_p = 0$ , поэтому введение обратной связи по производной разности давления рабочей жидкости  $\Delta \dot{p}(t)$  не только

не приводит к повышению точности замкнутой системы наведения и стабилизации, а наоборот, приводит к ее снижению.

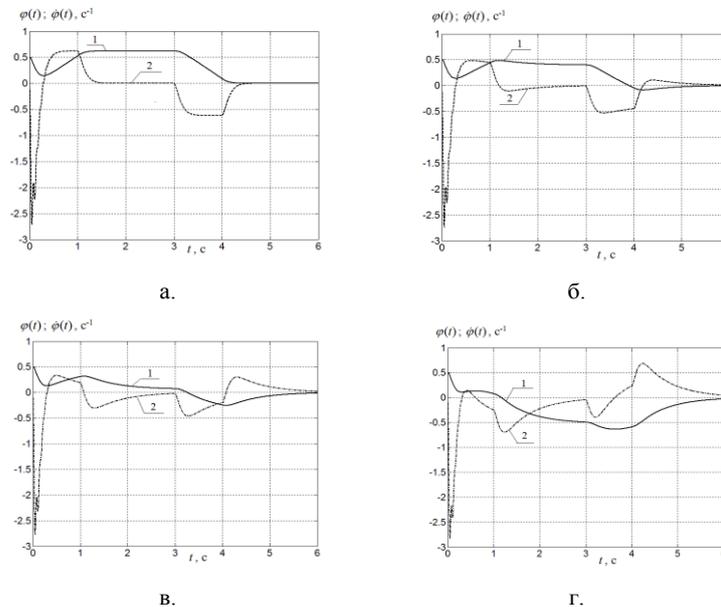


Рисунок 4 – Процессы отработки внешнего возмущения:

1 –  $\phi(t)$ ; 2 –  $\dot{\phi}(t)$ ; а. –  $k_p = 0$ ; б. –  $k_p = 0,3 \cdot 10^{-6} B \cdot Pa^{-1}$ ; в. –  $k_p = 0,736 \cdot 10^{-6} B \cdot Pa^{-1}$ ; г. –  $k_p = 1,2 \cdot 10^{-6} B \cdot Pa^{-1}$

Таким образом, алгоритм стабилизации, реализуемый инвариантной системой наведения и стабилизации танковой пушки в канале вертикального наведения, целесообразно выбирать в виде

$$U_{\phi}(t) = k_{\phi}^* \phi(t) + k_{\dot{\phi}}^* \dot{\phi}(t) + k_p \Delta p(t),$$

где значение варьируемого параметра  $k_p$  выбирается из условия (17).

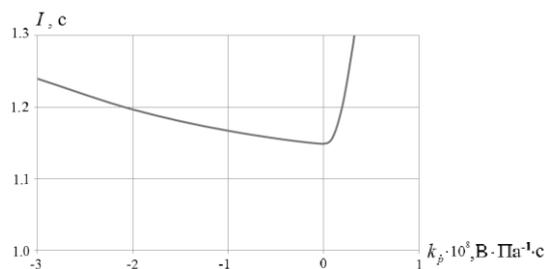


Рисунок 5 – Зависимость функционала (11) от варьируемого параметра  $k_p$

#### Литература

1. Ледовский А.Д., Свердлов Р.И. Анализ возмущающих воздействий неуравновешенной танковой башни // Вестник бронетанковой техники. – 1969. – № 1. – С. 7–10.
2. Пат. UA 83903 від 10.10.2013, Україна. МПК F41G 5/00. Стабілізатор танкової гармати / Александрова Т.Е., Лазаренко А.О. НТУ "ХПУ". Заявка № 201300690 від 21.01.13. Бюл. №19.
3. Александрова Т.Е., Лазаренко А.А. Параметрический синтез инвариантного стабилизатора танковой пушки // Интегровані технології та енергозбереження. – 2013. – №2. – С. 11–46.
4. Александрова Т.Е., Истомин А.Е., Костяник И.В. Параметрический синтез оптимального стабилизатора танковой пушки // Механіка та машинобудування. – 2012. – №2. – С. 203–210.
5. Александров Е.Е., Александрова Т.Е. Выбор оптимизируемого функционала в задачах параметрического синтеза систем стабилизации // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2004. – №2(11). – С. 23–26.

6. Александрова Т.Е. О единственности решения задачи параметрического синтеза линейной динамической системы с интегральным квадратичным критерием оптимальности // Системы обработки информации: сборник научных работ. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил. – 2013. – Вип. 7(114). – С. 116–120.

Bibliography (transliterated)

1. Ledovskiy A.D., Sverdlov R.I. Analiz vozmushchayuschih vozdeystviy neuravnoveshennoy tankovoy bashni. Vestnik bronetankovoy tehniki. – 1969. – # 1. – P. 7–10.
2. Pat. UA 83903 vid 10.10.2013, Ukrayina. MPK F41G 5/00. Stabilizator tankovoyi garmati. Aleksandrova T.E., Lazarenko A.O. NTU "HPU". Zayavka # 201300690 vid 21.01.13. Byul. #19.
3. Aleksandrova T.E., Lazarenko A.A. Parametricheskii sintez invariantnogo stabilizatora tankovoy pushki. Integrovani tehnologii ta energozberezheniya. – 2013. – #2. – P. 11–46.
4. Aleksandrova T.E., Istomin A.E., Kostyanik I.V. Parametricheskii sintez optimalnogo stabilizatora tankovoy pushki. Mehanika ta mashinobuduvannya. – 2012. – #2. – P. 203–210.
5. Aleksandrov E.E., Aleksandrova T.E. Vyibor optimiziruemogo funktsionala v zadachah parametricheskogo sinteza sistem stabilizatsii. Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzhenie. – 2004. – #2(11). – P. 23–26.
6. Aleksandrova T.E. O edinstvennosti resheniya zadachi parametricheskogo sinteza lineynoy dinamicheskoy sistemy s integralnyim kvadrachnym kriteriem optimalnosti. Sistemi obrabki informatsiyi: zbirnik naukovih prats. – H.: Harkivskiy universitet Povitryanih Sil. – 2013. – Vip. 7(114). – P. 116–120.

УДК 519.81:681.51

Борисюк М.Д., Александров Є.Є., Александрова Т.Є.

**ДО ЗАДАЧІ ПОБУДОВИ ІНВАРІАНТНОГО СТАБІЛІЗАТОРА КАНАЛУ ВЕРТИКАЛЬНОГО НАВЕДЕННЯ ОСНОВНОГО ОЗБРОЄННЯ ТАНКА**

В роботі розглядається задача вибору значень варійованих параметрів алгоритму стабілізації, що формується електронним блоком інваріантного стабілізатора каналу вертикального наведення танкової гармати, і пропонується відшукувати їх з умови досягнення необхідного ступеня інваріантності замкнутої системи стабілізації до дії зовнішніх збурень. Доведено, що алгоритм стабілізації, реалізований інваріантною системою наведення і стабілізації танкової гармати в каналі вертикального наведення, доцільно вибирати без урахування зворотного зв'язку по похідною різниці тиску робочої рідини.

Borysyuk M.D., Alexandrov Ye.Ye., Alexandrova T.Ye.

**TO THE PROBLEM OF CONSTRUCTING AN INVARIANT STABILIZER OF THE CHANNEL VERTICAL GUIDANCE OF THE TANK'S MAIN ARMAMENT**

The problem of choosing the values of variable parameters stabilization algorithm generated electronic unit invariant stabilizer channel vertical guidance tank gun and offers retrieve them from the condition of the desired degree of invariance of a closed system to stabilize the action of external perturbations is considered. We prove that the stabilization algorithm implemented invariant system guidance and stabilization tank gun in the channel vertical guidance, it is advisable to choose without feedback from the derivative of the difference of pressure of the working fluid.