

УДК 621.313

## ИНВАРИАНТНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ТАНКОВОЙ БАШНИ

**Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко**

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина. E-mail: aleksandrova.t.ye@gmail.com

Целью настоящей работы является разработка алгоритма стабилизации танковой башни, реализуемого электронным блоком стабилизации и доставляющего замкнутой системе стабилизации свойство инвариантности к действию внешних возмущений без снижения запаса устойчивости системы. Повышение степени инвариантности регулируемого электропривода танковой башни к действию внешнего возмущения, связанного с возникновением центробежных сил при повороте танка, приводит к снижению запаса устойчивости замкнутой системы стабилизации. Для повышения работоспособности регулируемого электропривода предлагается введение дополнительной обратной связи по угловому ускорению башни. Разработана ранее не известная структура цифровой системы управления электроприводом танковой башни, которая обеспечивает свойство инвариантности замкнутой системы управления к действию внешних возмущений и учитывает информацию об угловом ускорении танковой башни относительно ее оси поворота. Получение такой информации осуществляется путем использования цифрового низкочастотного фильтра Ланцоша в цифровом электронном блоке управления.

**Ключевые слова:** танковая башня, цифровой регулируемый электропривод, инвариантный электропривод, цифровой низкочастотный фильтр.

## ИНВАРИАНТНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД НАВЕДЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ ТАНКОВОЇ БАШТИ

**Т. Є. Александрова, А. О. Лазаренко**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна. E-mail: aleksandrova.t.ye@gmail.com

Метою даної роботи є розробка алгоритму стабілізації танкової башти, який реалізується електронним блоком стабілізації й доставляє замкнутій системі стабілізації властивість інваріантності до дії зовнішніх збурень без зниження запасу стійкості системи. Підвищення ступеня інваріантності регульованого електропривода танкової башти до дії зовнішнього збурення, пов'язаного з виникненням відцентрових сил при повороті танка, призводить до зниження запасу стійкості замкненої системи стабілізації. Для підвищення працездатності регульованого електроприводу пропонується введення додаткового зворотного зв'язку по кутовому прискоренню башти. Розроблено раніше не відому структуру цифрової системи керування електроприводом танкової башти, яка забезпечує властивість інваріантності замкнутої системи керування до дії зовнішніх збурень і враховує інформацію про кутове прискорення танкової башти відносно її осі повороту. Отримання такої інформації здійснюється шляхом використання цифрового низькочастотного фільтра Ланцоша в цифровому електронному блоці управління.

**Ключові слова:** танкова башта, цифровий керуємий електропривод, інваріантний електропривод, цифровий низькочастотний фільтр.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В канале горизонтального наведения основного вооружения танка поворот танковой башни осуществляется при помощи исполнительного электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения, запрашиваемого от электромашинного усилителя.

На рис. 1 приведена функциональная схема электропривода постоянного тока системы наведения и стабилизации танковой башни, где приняты следующие обозначения: ЭБ – электронный блок, формирующий управляющий сигнал  $u(t)$ ; ПУ – предварительный усилитель мощности, формирующий сигнал  $u_g(t)$ , подаваемый на вход обмотки возбуждения электронного усилителя ЭМУ, формирующе-

го входной сигнал  $e_{ЭМУ}(t)$ ; ПЭД – приводной электродвигатель, передающий вращение с постоянной угловой скоростью  $\omega$  якорю генератора ЭМУ, формирующему выходной сигнал  $u_{ЭМУ}(t)$ ; ИЭД – исполнительный электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения, якорь которого через понижающий редуктор Р связан с танковой башней Б; БД – блок датчиков, содержащий гироскопический датчик угла ГДУ, гироскопический датчик угловой скорости ГДУС и датчик линейных ускорений ДЛУ, ось чувствительности которого параллельна собственной поперечной оси танковой башни; ПН – пульт наведения; ЭН – электромагнит наведения ГДУ.

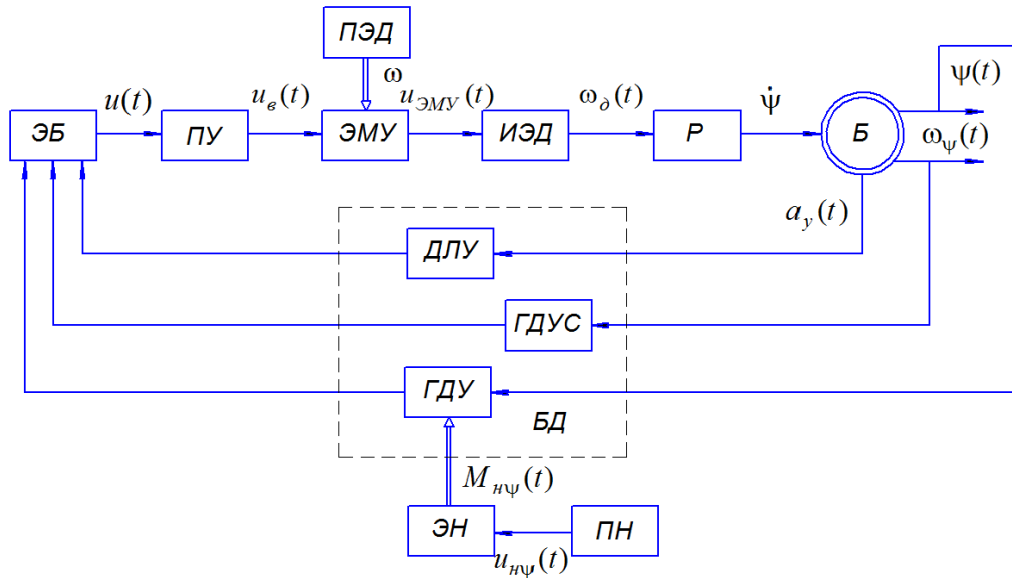


Рисунок 1 – Функціональна схема електропривода наведення танкової пушки

Танковая башня неуравновешенна относительно оси поворота, поэтому составляющая линейного ускорения  $a_y(t)$ , возникающая при повороте танка с угловой скоростью поворота корпуса  $\dot{\psi}_k(t)$  или при ускоренном (замедленном) движении с ускорением  $\dot{v}(t)$  вследствие действия инерционных сил, приложенных к центру масс башни, направлена вдоль поперечной оси башни  $o_\delta y_\delta$  и вызывает возмущающий момент

$$M_e(t) = -m_\delta h [\dot{\psi}_k(t) v(t) \cos \psi_0(t) + \dot{v}(t) \sin \psi_0(t)] = -m_\delta h a_y(t) \quad (1)$$

относительно оси вращения башни, который является причиной увода башни с пушкой от заданного направления на цель (рис. 2).  $\psi_0(t)$  в уравнении (1) обозначен текущий угол поворота башни относительно корпуса, а  $v(t)$  – текущая скорость движения танка;  $m_\delta$  – масса башни;  $h$  – плечо приложения инерционной силы.

Аналоговый стабилизатор башни отечественных танков формирует закон стабилизации в виде

$$U(t) = k_\psi \psi(t) + k_{\dot{\psi}} \dot{\psi}(t) + k_a a_y(t), \quad (2)$$

где  $\psi(t)$  – угол отклонения в горизонтальной плоскости оси канала ствола танковой пушки относительно направления на цель, измеряемый гироскопическим датчиком угла;  $\dot{\psi}(t)$  – угловая скорость поворота танковой башни, измеряемая гироскопическим датчиком угловой скорости;  $a_y(t)$  – составляющая линейного ускорения танковой башни, направленная вдоль поперечной оси башни и измеряемая датчиком линейных ускорений;  $k_\psi, k_{\dot{\psi}}, k_a$  – варьируемые коэффициенты усиления закона стабилизации (2).

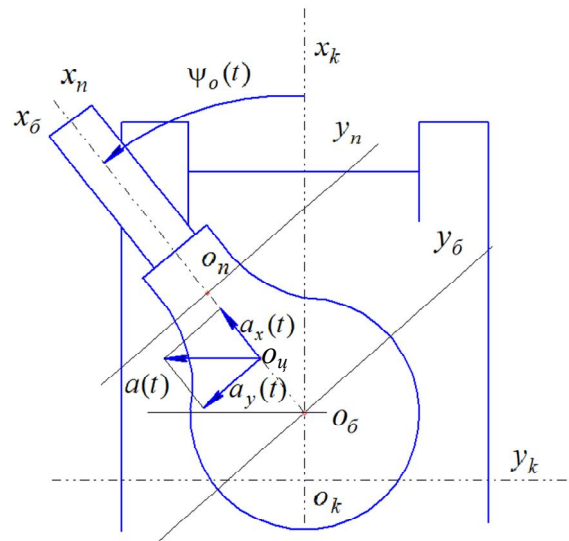


Рисунок 2 – Системы координат:  $o_k x_k y_k$  – связанная с корпусом;  $o_\delta x_\delta y_\delta$  – связанная с башней;  $o_n x_n y_n$  – связанная с пушкой

Аналоговый стабилизатор, реализующий закон стабилизации (2), объединяет два известных принципа управления, а именно: принцип управления по возмущению путем измерения составляющей линейного ускорения башни вдоль её поперечной оси с дальнейшим использованием измеренной величины в соотношении (2) и принцип управления по отклонению путем измерения угла  $\psi(t)$  и угловой скорости  $\dot{\psi}(t)$ .

При такой комбинации двух принципов управления стабилизатор приобретает свойство инвариантности к действию внешних возмущений и точность стабилизации оси канала ствола танковой пушки в

плоскості горизонтального наведення значительно возрастает.

Вместе с тем известно, что повышение степени инвариантности системы к действию внешних возмущений приводит к снижению её запаса устойчивости, вплоть до выхода рабочей точки системы за пределы области устойчивости и потери ею работоспособности [1].

Целью настоящей работы является разработка алгоритма стабилизации танковой башни, реализуемого электронным блоком стабилизации и доставляющего замкнутой системе стабилизации свойство инвариантности к действию внешних возмущений без снижения запаса устойчивости системы.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.**

Для получения больших значений коэффициента усиления по мощности в канале горизонтального наведения применяются два каскада усиления. В качестве первого каскада усиления используется поляризованное реле РПБ-5, линеаризованное с помощью автоколебаний, передаточный коэффициент которого составляет  $k_{my}$ .

Дифференциальное уравнение возмущенного движения ЭМУ с поперечным полем имеет вид [2, 3]:

$$T_2^2 \frac{d^2 u_{ЭМУ}(t)}{dt^2} + T_1 \frac{du_{ЭМУ}(t)}{dt} + u_{ЭМУ}(t) = k_{ЭМУ}(t) u_e(t), \quad (3)$$

где  $u_{ЭМУ}(t)$  – выходное напряжение ЭМУ;  $u_e(t)$  – напряжение на выходе предварительного усилителя ПУ, являющееся напряжением возбуждения ЭМУ.

Тогда передаточная функция ЭМУ записывается:

$$W_{ЭМУ}(s) = \frac{\mathcal{L}\{U_{ЭМУ}(t)\}}{\mathcal{L}\{U_{ny}(t)\}} = \frac{k_{ЭМУ}}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1},$$

где  $\mathcal{L}$  – символ преобразования Лапласа;  $k_{ЭМУ}$  – коэффициент усиления ЭМУ по напряжению, причем

$$k_{ЭМУ} = \frac{c_e^2 c_m^2 w_y w_n \omega^2}{r_y r_n},$$

где  $c_e, c_m$  – постоянные коэффициенты, определяемые параметрами электромашинного усилителя;  $w_y, w_n$  – число витков обмотки управления и поперечной обмотки;  $\omega$  – угловая скорость якоря усилителя;  $r_y, r_n$  – активные сопротивления обмотки управления и поперечной обмотки.

В соотношении (3) через  $T_2, T_1$  обозначены постоянные времени усилителя, определяемые уравнениями

$$T_2^2 = T_y T_n; T_1 = T_y + T_n,$$

где  $T_y$  – постоянная времени контура управления;  $T_n$  – постоянная времени поперечной цепи, причем

$$T_y = \frac{L_y}{r_y}; T_n = \frac{L_n}{r_n},$$

где  $L_y, L_n$  – индуктивности обмотки управления и поперечной обмотки.

Объектом управления в данном случае является танковая башня с исполнительным электродвигателем постоянного тока независимого возбуждения.

Запишем условие динамического равновесия танковой башни как

$$I_B \frac{d^2 \psi(t)}{dt^2} = M_c(t) - M_e(t), \quad (4)$$

где  $M_c(t)$  – стабилизирующий момент, развиваемый исполнительным электродвигателем:

$$M_c(t) = \frac{k_m}{i_p} i_a(t), \quad (5)$$

$k_m$  – коэффициент пропорциональности;  $i_p$  – передаточное отношение понижающего редуктора;  $i_a(t)$  – ток якоря исполнительного электродвигателя.  $M_e(t)$  в уравнении (4) обозначен возмущающий момент, определяемый соотношением (1).

Передаточная функция танковой башни записывается в виде соотношения

$$W_B(s) = \frac{\mathcal{L}\{\psi(t)\}}{\mathcal{L}\{i_a(t)\}} = \frac{k_m}{I_B i_p s^2}. \quad (6)$$

Электрическая часть исполнительного электродвигателя описывается дифференциальным уравнением

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + r_a i_a(t) = U_{ЭМУ}(t) - e_a(t), \quad (7)$$

где  $L_a$  и  $r_a$  – индуктивное и активное сопротивление якоря;  $e_a(t)$  – противо-ЭДС якоря, причем

$$e_a(t) = k_e \omega_d(t), \quad (8)$$

где  $\omega_d(t)$  – угловая скорость якоря электродвигателя, которая связана с угловой скоростью вращения башни зависимостью

$$\dot{\psi}(t) = \omega_d(t) i_p. \quad (9)$$

С учетом соотношений (8) и (9) уравнение (7) приобретает вид

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + r_a i_a(t) = U_{ЭМУ}(t) - \frac{k_e}{i_p} \dot{\psi}(t). \quad (10)$$

Тогда объект управления может быть представлен в виде расчетной схемы, приведенной на рис. 3.

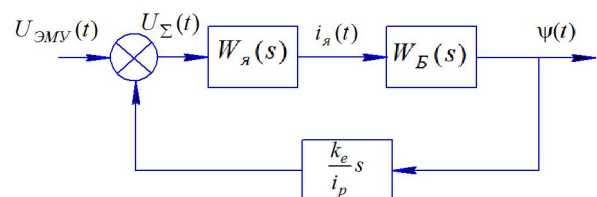


Рисунок 3 – Расчетная схема объекта управления

На рис. 3  $W_{я}(s)$  обозначена передаточная функция якоря электродвигателя, возмущенное движение которого описывается дифференциальным уравнением

$$T_{я} \frac{di_{я}}{dt} + i_{я} = k_{я} u_{\Sigma}(t), \quad (11)$$

что соответствует передаточной функции

$$W_{я}(s) = \frac{\mathcal{L}\{i_{я}(t)\}}{\mathcal{L}\{U_{\Sigma}(t)\}} = \frac{k_{я}}{T_{я}s + 1},$$

где коэффициент усиления и постоянная времени якоря ИЭД равны

$$k_{я} = \frac{1}{r_{я}}; \quad T_{я} = \frac{L_{я}}{r_{я}}.$$

Из рассмотрения расчетной схемы запишем передаточную функцию объекта стабилизации

$$W_o(s) = \frac{\mathcal{L}\{\psi(t)\}}{\mathcal{L}\{U_{ЭМВ}(t)\}} = \frac{k_{я} k_{м} i_{п}}{s[(T_{я}s + 1)I_{Б}i_{п}^2 s + k_{я} k_{м} k_e]}. \quad (12)$$

Подставим соотношения (1) и (5) в правую часть уравнения (4)

$$I_{Б} \frac{d^2 \psi(t)}{dt^2} = \frac{k_{м} i_{я}(t)}{i_{п}} - m_{Б} h a_{y}(t). \quad (13)$$

Если при работающем стабилизаторе к центру масс башни приложен возмущающий момент (1), то этот момент вызывает возрастание тока в якоре цепи исполнительного электродвигателя, значение которого связано со значением линейного ускорения  $a_{y}(t)$  соотношением

$$i_{я}(t) = \frac{m_{Б} h i_{п}}{k_{м}} a_{y}(t). \quad (14)$$

В результате расчетная схема замкнутой инвариантной системы наведения и стабилизации танковой пушки в канале горизонтального наведения может быть представлена в виде (рис. 4):

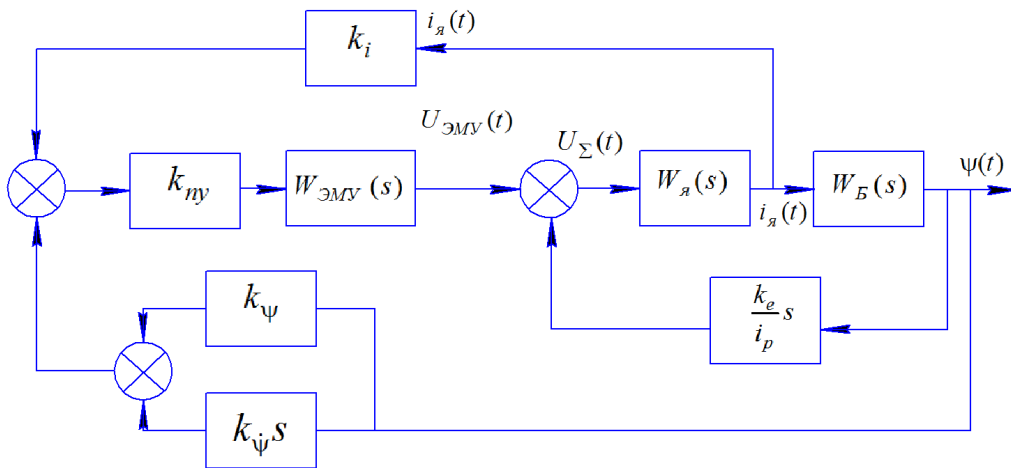


Рисунок 4 – Расчетная схема замкнутой системы наведения и стабилизации танковой башни

В расчетной схеме (рис. 4)  $k_i$  – варьируемый параметр стабилизатора по внешнему возмущению, вызывающему изменение тока якоря  $i_{я}(t)$  исполнительного электродвигателя. Из этой же схемы запишем соотношение для передаточной функции разомкнутой системы

$$W_p(t) = \frac{k_{нy} k_{ЭМВ} i_{п}}{k_e (1 - k_{нy} k_{ЭМВ} k_{я} k_i)} \times \frac{(T_{я}s + 1)(k_{\psi} + k_{\psi}s)}{s(T_{33}s^3 + T_{32}s^2 + T_{31}s + 1)(T_{я}T_{м}s^2 + T_{м}s + 1)}. \quad (15)$$

Введем обозначение

$$k_p = \frac{k_{нy} k_{ЭМВ} i_{п}}{k_e (1 - k_{нy} k_{ЭМВ} k_{я} k_i)}. \quad (16)$$

Величину  $k_p$  назовем коэффициентом усиления разомкнутого электропривода.

В результате соотношение (15) приобретает вид

$$W_p(t) = \frac{k_p (T_{я}s + 1)(k_{\psi} + k_{\psi}s)}{s(T_{33}s^3 + T_{32}s^2 + T_{31}s + 1)(T_{я}T_{м}s^2 + T_{м}s + 1)}, \quad (17)$$

где  $T_{31}$ ,  $T_{32}$ ,  $T_{33}$  – электрические постоянные времени электропривода танковой башни;  $T_{м}$  – механическая постоянная времени электропривода, определяемые зависимостями

$$T_{31} = \frac{T_1 + T_{я}}{1 - k_{нy} k_{ЭМВ} k_{я} k_i}; \quad T_{32} = \frac{T_2^2 + T_1 T_{я}}{1 - k_{нy} k_{ЭМВ} k_{я} k_i}; \quad (18)$$

$$T_{33} = \frac{T_2^2 T_{я}}{1 - k_{нy} k_{ЭМВ} k_{я} k_i}; \quad T_{м} = \frac{I_{Б} i_{п}^2}{k_{я} k_{м} k_e}.$$

Анализ уравнения (17) позволяет сделать вывод о том, что степень астатизма рассматриваемой системы равна единице и не может быть повышена путем изменения значения варьируемого коэффициента  $k_i$ . В то же время изменением значения коэффициента  $k_i$  в интервале

$$0 \leq k_i \leq \frac{1}{k_{ny}k_{ЭМУ}k_{я}} \quad (19)$$

можно достигнуть значительного повышения коэффициента усиления разомкнутого электропривода, что приводит к повышению степени инвариантности замкнутой системы.

Рассмотрим характеристическое уравнение замкнутого регулируемого электропривода танковой башни

$$1 + W_p(s) = T_{э3}^3 T_{я} T_{м} s^6 + (T_{э3}^3 T_{м} + T_{э2}^2 T_{я} T_{м}) s^5 + (T_{э3}^3 + T_{э2}^2 T_{м} + T_{э1} T_{я} T_{м}) s^4 + (T_{э2}^2 + T_{я} T_{м} + T_{э1} T_{м}) s^3 + (T_{э1} + T_{м}) s^2 + s + k_p (T_{я} s + 1) (k_{\psi} + k_{\dot{\psi}} s) = 0. \quad (20)$$

Значение электрических постоянных времени электропривода  $T_{я}$ ,  $T_{э1}$ ,  $T_{э2}$  и  $T_{э3}$  значительно меньше, чем значение механической постоянной времени  $T_{м}$ . В этой связи характеристическое уравнение замкнутого электропривода (20) приближенно можно представить в виде

$$T_{э3}^3 T_{я} T_{м} s^6 + (T_{э3}^3 + T_{э2}^2 T_{я}) T_{м} s^5 + (T_{э2}^2 + T_{э1} T_{я}) T_{м} s^4 + (T_{я} + T_{э1}) T_{м} s^3 + T_{м} s^2 + s + k_p (k_{\psi} + k_{\dot{\psi}} s) = 0. \quad (21)$$

С учетом уравнений (16) и (18) характеристическое уравнение (21) записывается

$$k_e T_{э2}^2 T_{я} T_{м} s^6 + k_e (2T_{э2}^2 + T_{э1} T_{я}) T_{я} T_{м} s^5 + [T_{э2}^2 + T_{э1} T_{я} + (T_{э1} + T_{я}) T_{м}] s^4 + k_e [T_{я} (1 - k_{ny} k_{ЭМУ} k_{я} k_i) + T_{э1} + T_{я}] s^3 + k_e (1 - k_{ny} k_{ЭМУ} k_{я} k_i) T_{м} s^2 + k_{ny} k_{ЭМУ} i_p k_{\psi} s + k_{ny} k_{ЭМУ} i_p k_{\dot{\psi}} = 0. \quad (22)$$

Вместе с тем возрастание коэффициента  $k_i$  приводит к снижению запаса устойчивости замкнутой системы. Действительно, при  $k_i = k_i^{\max}$  коэффициент характеристического уравнения при  $s^2$  замкнутой системы (22) обращается в нуль, что соответствует потере замкнутой системой устойчивости.

В работах [4, 5] показано, что повышение запаса устойчивости системы наведения и стабилизации танковой пушки может быть достигнуто путем использования управления по старшей производной.

В расчетную схему, представленную на рис. 4, введем дополнительную обратную связь по угловому ускорению башни  $\ddot{\psi}(t)$ . Тогда коэффициент при  $s^2$  характеристического уравнения (22) принимает вид

$$k_e (1 - k_{ny} k_{ЭМУ} k_{я} k_i) T_{м} + k_{\ddot{\psi}}, \quad (23)$$

что позволяет сделать вывод о том, что закон стабилизации

$$U(t) = k_{\psi} \psi(t) + k_{\dot{\psi}} \dot{\psi}(t) + k_i i_{я}(t) + k_{\ddot{\psi}} \ddot{\psi}(t) \quad (24)$$

доставляет замкнутому электроприводу танковой башни свойство инвариантности к действию внешнего возмущения (1) без заметного ухудшения запаса устойчивости замкнутой системы.

Подставляя в соотношение (24) выражение (14), получаем закон стабилизации в виде

$$U(t) = k_{\psi} \psi(t) + k_{\dot{\psi}} \dot{\psi}(t) + k_a a_y(t) + k_{\ddot{\psi}} \ddot{\psi}(t), \quad (25)$$

где

$$k_a = k_i \frac{m_B h i_p}{k_m}.$$

Практически все без исключения системы наведения и стабилизации современных танков являются цифровыми [6]. Структурная схема цифрового регулируемого электропривода канала горизонтального наведения приведена на рис. 5, где приняты следующие обозначения: ГДУ – гироскопический датчик угла; ГДУС – гироскопический датчик угловой скорости; ДЛУ – датчик линейных ускорений; ЦЭБ – цифровой электронный блок; В1, В2, В3 – выпрямители выходных сигналов вращающихся трансформаторов датчиков; ПАК – преобразователь «аналог–код»; ФБ1, ФБ2, ФБ3 – фильтры Баттеруорта; ФЛ – фильтр Ланцоша; ПКА – преобразователь «код–аналог»; ИО – исполнительный орган стабилизатора танковой башни; ПУ – предварительный усилитель; ЭМУ – электромашинный усилитель; ИЭД – исполнительный электродвигатель; Р – редуктор; Б – башня.

В работе [7] показано, что последовательно-параллельное соединение фильтров Баттеруорта и Ланцоша, приведенное в схеме на рис. 5, обеспечивает более эффективное подавление высокочастотных помех и более точную оценку решетчатой функции на выходе фильтра Ланцоша по сравнению с параллельным соединением этих фильтров.

В этом случае алгоритм стабилизации танковой башни записывается в виде

$$u[nT] = k_{\psi} u_{\psi}[nT] + k_{\dot{\psi}} u_{\dot{\psi}}[nT] + k_a u_a[nT] + k_{\ddot{\psi}} u_{\ddot{\psi}}[nT], \quad (26)$$

где  $u_{\psi}[nT]$ ,  $u_{\dot{\psi}}[nT]$ ,  $u_a[nT]$  – решетчатые функции, соответствующие выходным сигналам датчиков угла, угловой скорости и линейных ускорений, отфильтрованным цифровыми низкочастотными фильтрами Баттеруорта;  $u_{\ddot{\psi}}[nT]$  – решетчатая функция на выходе дифференцирующего фильтра Ланцоша. Алгоритмы формирования перечисленных решетчатых функций при использовании цифровых фильтров второго порядка имеют следующий вид [7, 8]:

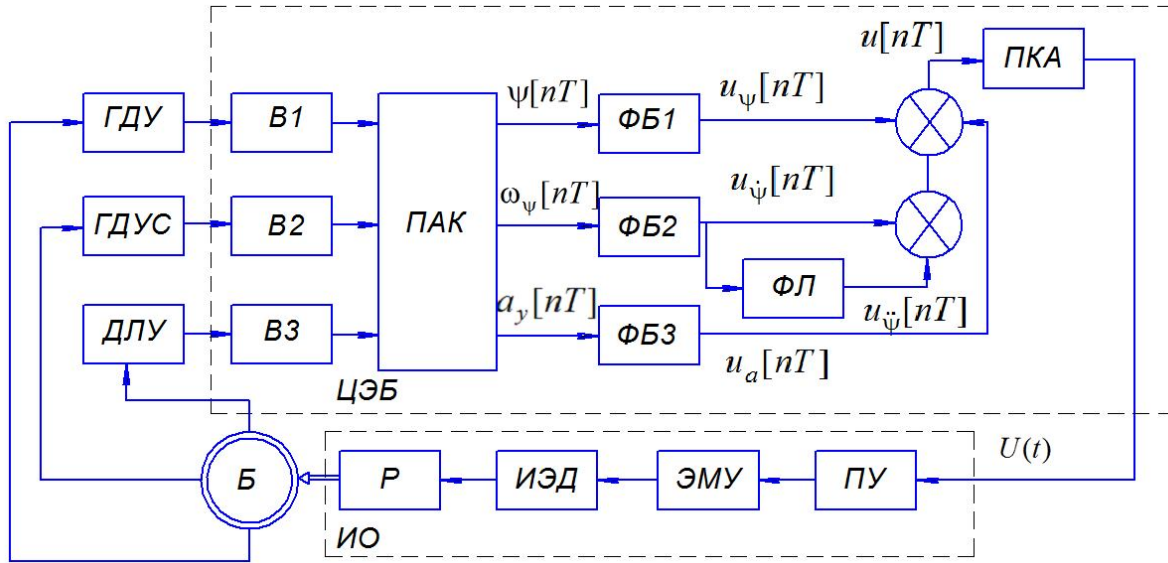


Рисунок 5 – Структурная схема регулируемого электропривода с цифровым управлением

$$\begin{aligned}
 u_{\psi}[nT] &= a_1 \{ \psi[nT] + 2\psi[(n-1)T] + \psi[(n-2)T] \} - \\
 &\quad - d_1 u_{\psi}[(n-1)T] - d_2 u_{\psi}[(n-2)T]; \\
 u_{\dot{\psi}}[nT] &= a_1 \{ \omega_{\psi}[nT] + 2\omega_{\psi}[(n-1)T] + \\
 &\quad + \omega_{\psi}[(n-2)T] \} - d_1 u_{\dot{\psi}}[(n-1)T] - d_2 u_{\dot{\psi}}[(n-2)T]; \\
 u_{\alpha}[nT] &= a_1 \{ a_{\gamma}[nT] + 2a_{\gamma}[(n-1)T] + \\
 &\quad + a_{\gamma}[(n-2)T] \} - d_1 u_{\alpha}[(n-1)T] - d_2 u_{\alpha}[(n-2)T]; \\
 u_{\ddot{\psi}}[nT] &= c_0 u_{\dot{\psi}}[nT] + c_1 u_{\dot{\psi}}[(n-1)T] - \\
 &\quad - c_1 u_{\dot{\psi}}[(n-3)T] - c_0 u_{\dot{\psi}}[(n-4)T].
 \end{aligned} \quad (27)$$

В алгоритмах (26), (27) через  $T$  обозначен период квантования цифрового электронного блока, а через  $a_1, d_1, d_2, c_0$  и  $c_1$  – параметры цифровых низкочастотных фильтров, определяющие полосу пропускания соответствующих сигналов.

В качестве примера рассмотрим процессы обработки замкнутой системой наведения и стабилизации танковой башни внешнего возмущающего момента  $M_e(t)$ , возникающего при повороте танка [9]

$$M_f(t) = \begin{cases} 2 \cdot 10^4 t \text{ Нм при } 0 \leq t < 1; \\ 2 \cdot 10^4, 1 \text{ Нм при } 1 \leq t < 3; \\ 2 \cdot 10^4 (4-t) \text{ Нм при } 3 \leq t < 4; \\ 0 \text{ Нм при } t \geq 4. \end{cases} \quad (28)$$

Участок линейного нарастания внешнего возмущения  $M_e(t)$  соответствует входу танка в поворот; участок постоянного значения внешнего возмущения соответствует равномерному повороту танка с постоянной угловой скоростью корпуса; участок линейного снижения внешнего возмущения соответствует выходу танка из режима поворота и воз-

вращения его к режиму равномерного прямолинейного движения.

Для повышения процессов обработки внешнего возмущения (28) производилось интегрирование дифференциальных уравнений (4), (3), (10) и (11). Работа преобразователя «код–аналог» описывается соотношением

$$u(t) = \begin{cases} u[nT], nT \leq t < (n+1)T; \\ u[(n+1)T], (n+1)T \leq t < (n+2)T, \end{cases} \quad (29)$$

а решетчатая функция  $U[nT]$  формировалась цифровым электронным блоком в соответствии с алгоритмами (26), (27).

Численные значения параметров объекта стабилизации и цифрового стабилизатора принимались равными [10]:

$$\begin{aligned}
 I_o &= 3,736 \cdot 10^3 \text{ Нмс}^2; k_{ЭМУ} = 22; L_y = 0,001 \text{ Гн}; \\
 r_y &= 10 \text{ Ом}; L_n = 0,005 \text{ Гн}; r_n = 30 \text{ Ом}; \\
 L_{я} &= 0,003 \text{ Гн}; r_{я} = 20 \text{ Ом}; k_e = 1,1 \text{ В} \cdot \text{с}; i_p = 0,01; \\
 k_m &= 1,238 \cdot 10^7 \text{ НмА}^{-1}; m_o = 13,28 \cdot 10^3 \text{ кг}; h = 0,14 \text{ м}; \\
 k_{\psi} &= 165; k_{\dot{\psi}} = 12,5; k_{\ddot{\psi}} = 5,26; a_1 = 0,1219; \\
 d_1 &= -1,2401; d_2 = 0,4572; c_0 = 5; c_1 = 2,5.
 \end{aligned}$$

Процессы отработки внешнего возмущения (28) приведены на рис. 6 при различных значениях варьируемого параметра  $k_a$ . Работа преобразователя «код–аналог» описывается соотношением (29).

Анализ приведенных процессов приводит к выводу, что наивысшая точность обработки внешнего возмущения (28) имеет место при значении константы  $k_a$  алгоритма (26), равной 0,736.

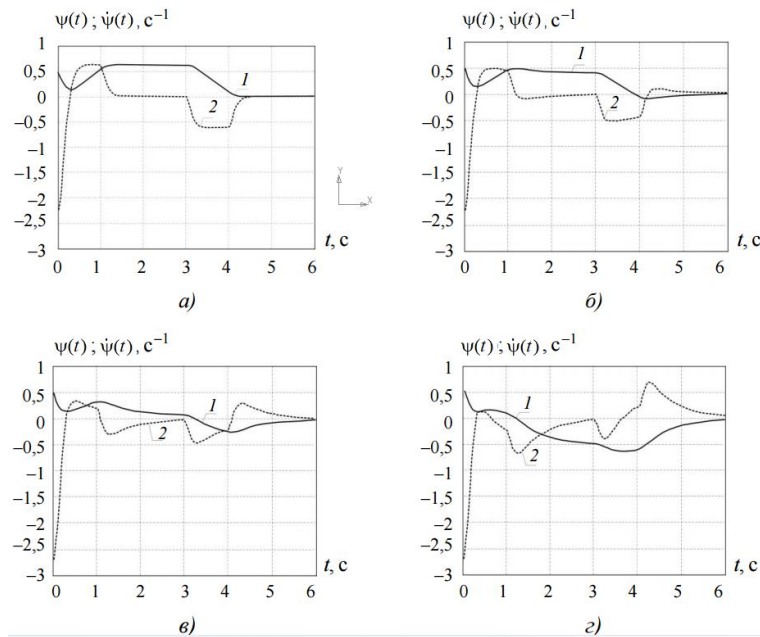


Рисунок 6 – Процессы отработки внешних возмущений: 1– $\psi(t)$ ; 2– $\dot{\psi}(t)$ ; а– $k_a = 0$ ; б– $k_a = 0,3$ ; в– $k_a = 0,736$ ; з– $k_a = 1,2$

**ВЫВОДЫ.** Повышение степени инвариантности регулируемого электропривода танковой башни к действию внешнего возмущения, связанного с возникновением центробежных сил при повороте танка, приводит к снижению запаса устойчивости замкнутой системы стабилизации. Для повышения работоспособности регулируемого электропривода предлагается введение дополнительной обратной связи по угловому ускорению башни. Для получения информации об угловом ускорении башни предлагается использование в цифровом электронном блоке системы стабилизации низкочастотного фильтра Ланцоша.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Е.Е., Александрова Т.Е. Параметрический синтез цифровой системы стабилизации танковой пушки // Проблемы управления и автоматизации. – 2015. – Вып. 6. – С. 5–20.
2. Корнеев В.В., Кузнецов М.И., Кузьмин Л.П. Основы автоматизации и танковые автоматические системы. – М.: АБТВ, 1976. – 545с.
3. Албесімов О.К., Александров Є.Є., Александрова І.Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. – Т.3: Автоматичне керування озброєнням танків. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 444 с.

4. Александрова Т.Е., Лазаренко А.А. Устойчивость и инвариантность линейных систем стабилизации объектов военного назначения // Системы озброєння та військова техніка. – 2015. – Вып. 4(44). – С. 6–9.
5. Столяров В.М. Електромеханічна система з керуванням за вектором прогнозних змінних стану // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вып. 3 (19). – С. 378–379.
6. Дегтярев Г.Л., Сиразитдинов Т.К. Теоретические основы оптимального управления упругими космическими аппаратами. – М.: Машиностроение, 1986. – 216 с.
7. Ивашко А.В. Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – 240 с.
8. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Недра, 1984. – 221 с.
9. Борисюк М.Д., Куценко А.С., Александрова Т.Е. Структурно-параметрический синтез стабилизатора упругой танковой пушки // Озброєння та військова техніка. – 2014. – Вып. 4. – С. 20–34.
10. Александров Е.Е., Никонов О.Я., Олиарник Б.А. Построение области устойчивости замкнутой системы наведения и стабилизации танковой пушки в плоскости коэффициентов усиления электронного блока управления // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2005. – Вып. 2. – С. 24–27.

#### INVARIANT ELECTRICDRIVE GUIDANCE AND STABILIZATION TANK TOWER

**T. Aleksandrova, A. Lazarenko**

National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute"  
vul. Frunze, 21, Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: aleksandrova.t.ye@gmail.com

**Purpose.** The aim of this work is to develop a algorithm stabilization of the tank's tower, implemented by the electronic unit stabilize, delivering a closed system of stabilization of the property of invariance to the action of external disturbances without compromising the stability margin of the system. **Methodology.** The research methodology con-

sists in analyzing the transfer function of the open-loop system automatic control electric drive of the tank's tower and the characteristic equation of the closed system, resulting in the conclusion about the necessity of using in the control algorithm the information about the angular acceleration of the tank's tower relative to its axis of rotation. **Results.** Increasing the degree of invariance of the adjustable electric drive of the tank's tower to the action of an external perturbation associated with the emergence of centrifugal forces during rotation of the tank, leads to a reduction of the stability margin of the closed-loop stabilization system. To improve efficiency, adjustable electric drive the additional feedback of the angular acceleration of the tower is proposed to introduce. For information about the angular acceleration of the tower is provided the use in the digital electronic unit of the system stabilization low-pass filter Lanczos. **Originality.** Developed not previously known structure of digital electric drive control system of the tank's tower, which ensures a property of invariance of the closed-loop control system to the action of external disturbances and takes into account information about the angular acceleration of the tank's tower relative to its axis of rotation. Obtaining such information is through the use of Lanczos's digital low-pass filter in the digital electronic control unit. **Practical value.** Developed a digital system of automatic control of electric drive of the tank's tower used in the process of creating of a digital system guidance and a stabilization of the tank gun for the upgraded tank "Oplot". References 4, figures 6.

**Key words:** Tank tower, digital controlled electric drive, invariant electric drive, digital low-pass filter.

#### REFERENCES

1. Alexandrov, Ye.Ye. and Alexandrova, T.Ye. (2015), "Parametric synthesis of digital systems tank gun stabilization", *Problemy upravleniyai avtomatiki*, no. 6, pp. 5–20. (in Russian)
2. Korneev, V.V., Kuznetsov, M.I. and Kuzmin, L.P. (1976), *Osnovy avtomatiki i tankovyye avtomaticheskie sistemy*, [Fundamentals of automation and tank automated systems], ABTV, Moscow. (in Russian)
3. Ablesimov, O.K., Alexandrov, Ye.Ye. and Alexandrova, I.Ye. (2008), *Avtomatychne keruvannya rukhomymy ob'yektamy I tekhnolohichnyy protsesamy, T.3, Avtomatychne keruvannya ozbroynnyam tankiv*, [Automatic control of moving objects and technological processes, Vol. 3, Automatic control of tank armament], NTU "KhPI", Kharkiv. (in Ukrainian)
4. Alexandrova, T.Ye. and Lazarenko, A.A. (2015), "Stability and invariance of linear stabilizing systems of military facilities", *Sistemy ozbroynnyy ta viyskova tekhnika*, Vol. 4, no. 44, pp. 37–41. (in Russian)
5. Stolyarov, V.M. (2012), "Electromechanical control system for predictive vector of state variables", *Elektromekhanichn i ienerhozberihayuchi sistemy*, Vol. 3, no. 19, pp. 378–379. (in Ukrainian)
6. Degtyarev, G.L. and Sirazitdinov, T.K. (1986), *Teoreticheskie osnovy optimalnogo upravleniya upravimiy kosmicheskimi apparatami*, [Theoretical foundations of optimal control elastic spacecraft], Mashinostroenie, Moscow. (in Russian)
7. Ivashko, A.V. (2005), *Metody I algoritmy tsifrovoy obrabotki signalov*, [Methods and algorithms for digital signal processing], NTU "KhPI", Kharkiv. (in Russian)
8. Hemming, R.V. (1984), *Tsifrovyye filtry*, [Digital filters], Nedra, Moscow. (in Russian)
9. Borisjuk, M.D., Kutsenko, A.S. and Alexandrova, T.Ye. (2014), "Structure-parametric synthesis elastic stabilizer tank gun. Part II. Parametric synthesis and comparative analysis of different structures of stabilizers", *Ozbroynnyy ta viyskovatekhnika*, no. 4, pp. 20–34. (in Ukrainian)
10. Alexandrov, Ye.Ye., Nikonov, O.Ya. and Oliyarnik, B.A. (2005), "Construction of the field stability of a closed guidance system and stabilizing tank gun in the plane of the electronic control unit gains", *Artillyrskoe I strelkovoe vooruzhenie*, no. 2, pp. 24–27. (in Russian)

Стаття надійшла 04.06.2016.