

УДК 62-55.681.515

Александров Е.Е., Сладких С.А., Пидашов В.В.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЁННОГО ДВИЖЕНИЯ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ ТАНКОВОГО ЗЕНИТНОГО ПУЛЕМЁТА

Постановка задачи. Структурная схема замкнутой системы наведения танковой зенитной установки (ТЗУ) приведена на рисунке 1, где приняты следующие обозначения: ПН – пульт наведения, ШИМ – широтно-импульсный модулятор, ОН – объект наведения, ТОС – тахогенератор обратной связи.

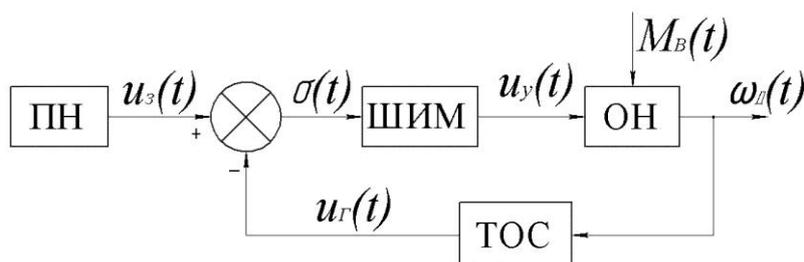


Рисунок 1 – Структурная схема замкнутой системы наведения ТЗУ

В работе [1] приведена разработанная авторами математическая модель возмущённого движения замкнутой системы наведения ТЗУ. Объект наведения в канале вертикального наведения представляет собой пулемётную установку с электромеханическим приводом, представляющим собой электродвигатель постоянного тока ДВН-1 последовательного возбуждения, связанный с механизмом поворота механическим редуктором с передаточным числом n . Математическая модель объекта наведения записывается в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\omega_{\ddot{A}}(t)}{dt} = \left[\frac{c_M \alpha}{I_{\Sigma}} i_{\dot{y}}^2(t) - \frac{M_B(t)}{I_{\Sigma} n \eta} \right] \text{sign}(\sigma(t)); \quad (1)$$

$$\frac{di_{\dot{y}}(t)}{dt} + -\frac{r_{\dot{y}}}{L_{\dot{y}}} i_{\dot{y}}(t) - \frac{c_E \alpha}{L_{\dot{y}}} i_{\dot{y}}(t) \omega_{\ddot{A}}(t) \text{sign}(\sigma(t)) + \frac{1}{L_{\dot{y}}} U_y(t), \quad (2)$$

где $\omega_{\ddot{A}}(t)$ – угловая скорость якоря исполнительного электродвигателя; $i_{\dot{y}}(t)$ – ток якоря электродвигателя; $U_y(t)$ – управляющий сигнал на выходе ШИМ; $M_B(t)$ – возмущающий момент в оси цапф ТЗУ; I_{Σ} – суммарный момент инерции ТЗУ, приведенный к якорю электродвигателя; $r_{\dot{y}}$ – сопротивление обмотки якоря; $L_{\dot{y}}$ – индуктивность цепи якоря; $\sigma(t)$ – входной сигнал ШИМ, определяемый соотношением:

$$\sigma(t) = u_{\zeta}(t) - u_{\ddot{A}}(t), \quad (3)$$

где $u_{\zeta}(t)$ – задающий сигнал на выходе ПН; $u_r(t)$ – сигнал обратной связи с выхода ТОС. Выходной сигнал ТОС определяется дифференциальным уравнением:

$$\frac{du_{\bar{A}}(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{\bar{A}}}u_{\bar{A}}(t) + \frac{K_{\bar{A}}}{T_{\bar{A}}}\omega_{\bar{A}}(t), \quad (4)$$

где $K_{\bar{A}}$, $T_{\bar{A}}$ – соответственно коэффициент усиления и постоянная времени ТОС.

Выходной управляющий сигнал ШИМ формируется в соответствии с алгоритмом:

$$u_y(t) = \begin{cases} U_0 \text{sign}(\sigma[kT_0]) & \text{и } \delta \leq kT_0 < t \leq (k + \gamma_k)T_0; \\ 0 & \text{и } \delta \leq (k + \gamma_k)T_0 < t \leq (k + 1)T_0, \end{cases} \quad (5)$$

где U_0 – амплитуда управляющего сигнала; k – номер управляющего импульса; T_0 – период следования управляющего импульса; γ_k – скважность k -го управляющего импульса, определяемая соотношением:

$$\gamma_k = \begin{cases} 1 & \text{и } \delta \leq \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta |u_{\zeta}| kT_0} \geq 1; \\ \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta |u_{\zeta}| kT_0} & \text{и } \delta \leq \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta |u_{\zeta}| kT_0} < 1, \end{cases} \quad (6)$$

где θ – варьируемый параметр ШИМ, подлежащий выбору.

В работе [2] поставлена и решена задача выбора варьируемого параметра θ при условии, что на решениях замкнутой системы (1)–(6) достигается минимума интегральный квадратичный функционал

$$I = \int_0^T [\beta_1^2 \sigma^2(t) + \beta_2^2 i_y^2(t)] dt, \quad (7)$$

а также, указана методика выбора весовых коэффициентов β_1 и β_2 функционала (7). Однако при этом полагалось, что внешние возмущения, действующие на ТЗУ в процессе движения танка по пересечённой местности, отсутствуют. Такое предположение, с одной стороны, упрощало решение задачи параметрического синтеза ШИМ, а с другой стороны, позволяло получить лишь приближённое решение задачи синтеза, т.к. постановка задачи игнорировала случайный характер динамических процессов наведения ТЗУ.

В данной статье ставится задача параметрического синтеза ШИМ ТЗУ с учётом стохастических внешних возмущений, действующих на ТЗУ при движении танка по пересечённой местности.

Имитационное моделирование внешних возмущений в замкнутой системе наведения ТЗУ. Продольно-угловые перемещения корпуса танка обусловлены рельефом местности и угловыми колебаниями подрессоренной части корпуса относительно непрессоренной. Момент трения в оси цапф ТЗУ, являющийся моментом внешних возмущений, определяется соотношением [3]:

$$M_B(t) = M_B^* \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}_k(t)) + \mu \cdot \dot{\varphi}_k(t), \quad (8)$$

где первое слагаемое представляет собой момент сухого трения, а второе – момент жидкостного трения, причём $\dot{\varphi}_k(t)$ – угловая скорость поворота подрессоренной части корпуса танка в инерционной системе координат, связанной с направлением на цель, μ – постоянный коэффициент, определяемый экспериментально.

Уравнения возмущённого движения подрессоренной части корпуса танка приведены в работе [4] и имеют вид:

$$\frac{d^2 Z_k(t)}{dt^2} + \xi \frac{dZ_k(t)}{dt} + a \cdot Z_k(t) + v \frac{d\varphi_k(t)}{dt} + b \cdot \varphi_k(t) = A_s(t) + B_s(t); \quad (9)$$

$$\frac{d^2 \varphi_k(t)}{dt^2} + \delta \frac{d\varphi_k(t)}{dt} + K \cdot \varphi_k(t) + \gamma \frac{dZ_k(t)}{dt} + d \cdot Z_k(t) = C_s(t) + D_s(t), \quad (10)$$

где $Z_k(t)$, $\varphi_k(t)$ – обобщённые координаты, характеризующие вертикальные и продольно-угловые координаты подрессоренной части корпуса танка; $A_s(t)$, $B_s(t)$, $C_s(t)$, $D_s(t)$ – функции времени, характеризующие внешние воздействия на танк со стороны грунта, и определяемые следующими соотношениями:

$$A_s(t) = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^n c_i \cdot q_s \left(t + \frac{l_i}{V_s} \right); \quad B_s(t) = \frac{2}{M} \sum_{j=1}^r \mu_j \cdot \dot{q}_s \left(t + \frac{l_j}{V_s} \right);$$

$$C_s(t) = \frac{2}{I_y} \sum_{i=1}^n c_i \cdot l_i \cdot q_s \left(t + \frac{l_i}{V_s} \right); \quad D_s(t) = \frac{2}{I_y} \sum_{j=1}^r \mu_j \cdot l_j \cdot \dot{q}_s \left(t + \frac{l_j}{V_s} \right),$$

где $q_s(t)$ – высота неровности грунта в момент времени t при движении танка со скоростью V_s ; M – масса подрессоренной части корпуса танка; I_y – момент инерции подрессоренной части корпуса танка относительно её собственной поперечной оси; μ_j – коэффициент демпфирования j -го амортизатора; c_j – коэффициент жёсткости i -той рессоры; l_j – расстояние по горизонтали от центра тяжести подрессоренной части корпуса танка до места крепления j -го амортизатора; l_i – расстояние от центра тяжести до места крепления i -той рессоры; n – количество рессор на один борт; r – количество амортизаторов на один борт.

Постоянные коэффициенты, входящие в левые части дифференциальных уравнений (9) и (10), определяются выражениями:

$$\xi = \frac{2}{M} \sum_{j=1}^r \mu_j; \quad a = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^n c_i; \quad v = \frac{2}{M} \sum_{j=1}^r \mu_j \cdot l_j; \quad b = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^n c_i \cdot l_i;$$

$$\delta = \frac{2}{I_y} \sum_{j=1}^r \mu_j \cdot l_j^2; \quad K = \frac{2}{I_y} \sum_{i=1}^n c_i \cdot l_i^2; \quad \gamma = \frac{2}{I_y} \sum_{j=1}^r \mu_j \cdot l_j; \quad d = \frac{2}{I_y} \sum_{i=1}^n c_i \cdot l_i.$$

Обычно в танках все амортизаторы и все рессоры одинаковы и в последних соотношениях принимают $\mu_j (j = 1, r) = \mu$; $c_i (i = 1, n) = c$.

В работе [5] показано, что функция $q_s(t)$, характеризующая внешнее возмущение, действующее на танк со стороны грунта, зависит от двух факторов:

– от скорости движения танка V_s , которая определяет временную интенсивность неровностей дороги, действующих на гусеничный движитель;

– от типа грунта, по которому совершает движение танк и который определяет амплитудную интенсивность неровностей дороги.

В общем случае функция $q_s(t)$ является случайной функцией времени и удовлетворяет дифференциальному уравнению:

$$T_1^2 \frac{d^2 q_s(t)}{dt^2} + T_2 \frac{dq_s(t)}{dt} + q_s(t) = K \cdot \xi(t), \quad (11)$$

где $\xi(t)$ – единичный ”белый шум”.

Таким образом, уравнения (1)–(6), (8)–(11) представляют собой имитационную модель возмущённого движения ТЗУ в процессе движения танка по пересечённой местности.

Параметрический синтез стохастической системы наведения ТЗУ. В связи с тем, что на вход имитационной модели (1)–(6), (8)–(11) подаётся единичный ”белый шум”, все функции, относительно которых составлены уравнения модели, являются случайными функциями времени, а функционал (7), вычисленный на решениях имитационной модели, является случайной величиной, значения которой зависят от конкретной j -й реализации ”белого шума” $\xi_j(t)$. Поэтому задача параметрического синтеза стохастической системы наведения ТЗУ состоит в поиске величины варьируемого параметра θ алгоритма (5), (6) такой, что на решениях имитационной модели достигает минимума функционал:

$$I = M_j \left\{ \int_0^T [\beta_1^2 \sigma^2(t) + \beta_2^2 i_y^2(t)] dt \right\}, \quad (12)$$

где $M_j\{\cdot\}$ – символ математического ожидания по реализациям единичного ”белого шума” $\xi_j(t)$, ($j = 1, \dots, N$).

К уравнениям имитационной модели (1)–(6), (8)–(11) добавим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dZ(t)}{dt} = \beta_1^2 \sigma^2(t) + \beta_2^2 i_y^2(t), \quad (13)$$

и на решениях системы (1)–(6), (8)–(11), (13) вычислим значения случайной величины $Z_j(T)$ при j -й реализации ”белого шума” $\xi_j(t)$, ($j = 1, \dots, N$). В результате получаем:

$$I(\theta) = M_j \{Z_j(T)\} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Z_j(T). \quad (14)$$

Зависимость функционала (14) от значения коэффициента θ приведена на рисунке 2.

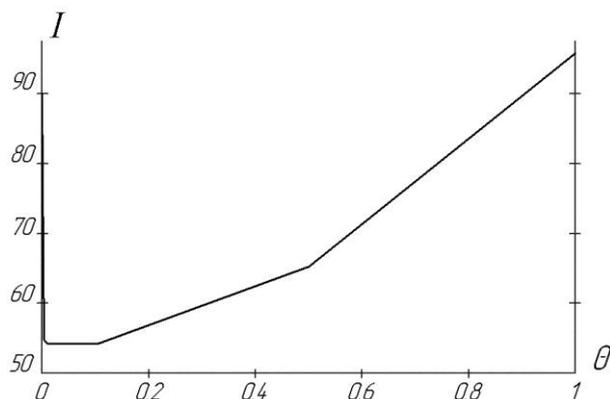


Рисунок 2 – Зависимость функционала (14) от варьируемого параметра θ

Анализ рисунка 2 приводит к выводу, что минимальное значение функционала (14) достигается при $0,01 \leq \theta \leq 0,1$.

Литература

1. Александров Е.Е., Костяник И.В., Сладких С.А. Динамические процессы в замкнутой системе управления танковой зенитной установкой // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – Киев: "Эссе", 2004. – № 3. – с. 12–14.
2. Александров Е.Е., Костяник И.В., Сладких С.А. Параметрический синтез электромеханической системы наведения танкового зенитного пулемёта // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков: 2005. – Вып. 45. – с. 33–36.
3. Александров Е.Е., Пидашов В.В. Повышение точности наводки танковой пушки рациональным выбором параметров стабилизатора и ходовой части танка // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – Киев: "Эссе", 2006. – № 4. – с. 23–26.
4. Балдин В.А. Теория и конструкция танка. – М.: АБТВ, 1972. – 782 с.
5. Александров Е.Е., Волонцевич Д.О., Лебедев А.Т. и др. Динамика транспортно-тяговых колёсных и гусеничных машин. – Харьков: ХГАДТУ, 2001. – 642 с.

УДК 62-55.681.515

Александров Є.Є., Сладкіх С.О., Пiдашов В.В.

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗБУРЕНОГО РУХУ ЗАМКНЕНОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ ТАНКОВОГО ЗЕНІТНОГО КУЛЕМЕТУ

В роботі пропонується вирішення задачі параметричного синтезу системи наведення танкового зенітного кулемету за допомогою розробленої імітаційної моделі збуреного руху системи наведення в умовах постійно діючих випадкових зовнішніх збурень.