

Т. Е. АЛЕКСАНДРОВА

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ ТАНКОВОЙ ЗЕНИТНОЙ УСТАНОВКИ

Рассматривается задача отыскания значений варьируемых параметров системы наведения танковой зенитной установки закрытого типа, в которой зенитный пулемет установлен на вращающейся командирской башенке, а наведение пулемета на воздушные и наземные цели осуществляется из командирской башенки с помощью пульта наведения, связанного с электроприводом импульсного регулирования. Показано, что качество работы системы наведения оценивается точностью поддержания заданной угловой скорости наведения, быстродействием и энергетическими затратами на наведение.

Ключевые слова: танковая зенитная установка, импульсная система регулирования, точность, быстродействие, энергетические затраты на наведение.

Введение. В украинских танках Т-64БМ «Булат», Т-80УД «Береза» и Т-84 «Оплот» нашли применение зенитные установки закрытого типа [1,2]. Зенитный пулемет калибром 12,7 мм установлен на командирской башенке. Наведение пулемета на воздушные и наземные цели осуществляется из командирской башенки с помощью пульта наведения, связанного с электроприводом импульсного регулирования.

Схема электропривода танковой зенитной установки (ТЗУ) приведена на рис. 1, где приняты обозначения: КБ – командирская башенка; Р – редуктор; ИЭД – исполнительный электродвигатель; ТГ – тахогенератор обратной связи; ПН – пульт наведения; РН – реостат наведения; ЦЭБН – цифровой электронный блок наведения.

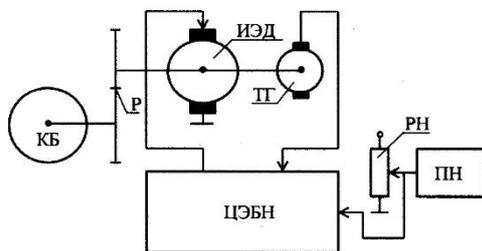


Рис. 1 – Электропривод наведения ТЗУ

ЦЭБН представляет собой широтно-импульсный модулятор (ШИМ) и формирует последовательность управляющих импульсов постоянной амплитуды U_0 , передние фронты которых отстают друг от друга на величину

T_0 :

$$U_y(t) = \begin{cases} U_0 \operatorname{sign} [U_3(t) - U_T(t)], & kT_0 \leq t < (k + \gamma)T_0; \\ 0, & (k + \gamma)T_0 \leq t < (k + 1)T_0, \end{cases} \quad (1)$$

причем скважность каждого управляющего импульса определяется соотношением

$$\gamma[kT_0] = \begin{cases} 1, & \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|} \geq 1; \\ \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|}, & \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|} < 1, \end{cases} \quad (2)$$

где θ – варьируемый параметр, подлежащий выбору; $U_3[kT_0]$ – сигнал на входе РН в момент времени $t = kT_0$; $\sigma[kT_0]$ – сигнал ошибки ТЗУ в момент времени $t = kT_0$:

$$\sigma[kT_0] = U_3[kT_0] - U_T[kT_0], \quad (3)$$

где $U_T[kT_0]$ – выходной сигнал ТГ.

Целью настоящей статьи является выбор значений варьируемых параметров системы наведения ТЗУ – передаточного отношения i_p редуктора Р, периода следования управляющих импульсов T_0 и величины θ , определяющей величину скважности управляющего импульса.

Основная часть. Используя результаты работы [1], математическую модель возмущенного движения объекта наведения ТЗУ представим в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\omega_d(t)}{dt} = \left[\frac{c_M k_M}{J_\Sigma i_p^2} i_{я}^2 - \frac{M_f(t)}{J_\Sigma i_p^2} \right] \text{sign}[U_3(t) - U_\Gamma(t)];$$

$$\frac{di_{я}(t)}{dt} = \frac{r_{я}}{l_{я}} i_{я}(t) - \frac{c_e k_M}{l_{я}} i_{я}(t) \times$$

$$\times \omega_d(t) \text{sign}[U_3(t) - U_\Gamma(t) + U_Y(t)];$$

$$\frac{dU_\Gamma(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{ТГ}} U_\Gamma(t) + \frac{k_{ТГ}}{T_{ТГ}} \omega_d(t),$$

где $\omega_d(t)$ – угловая скорость вращения якоря ИЭД; $i_{я}(t)$ – ток цепи якоря ИЭД; $M_f(t)$ – момент внешних возмущений, действующих на якорь электродвигателя; J_Σ – момент инерции командирской башенки с ТЗУ, боекомплектом и сидением командира танка с учетом массы командира относительно оси вращения башенки; i_p – передаточное отношение Р; c_M , c_e , k_M – постоянные конструктивные коэффициенты ИЭД; $r_{я}$ – активное сопротивление цепи якоря; $l_{я}$ – индуктивность цепи якоря; $k_{ТГ}$, $T_{ТГ}$ – коэффициент усиления и постоянная времени тахогенератора цепи обратной связи.

Уравнения (4) совместно с соотношениями (1)–(3) представляют собой математическую модель возмущенного движения замкнутой системы наведения ТЗУ. Значения параметров ТЗУ положим равными: $J_\Sigma = 0,51 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $c_M k_M = 0,71 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-2}$; $r_{я} = 0,42 \text{ Ом}$; $l_{я} = 0,001 \text{ Гн}$; $c_e k_M = 0,0096 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}^{-1}$; $U_0 = 27 \text{ В}$; $T_{ТГ} = 0,05 \text{ с}$; $k_{ТГ} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$.

В связи с тем, что момент, развиваемый ИЭД, намного превышает момент сопротивления $M_f(t)$, положим в математической модели (1)–(4) $M_f(t) = 0$. Рассмотрим зависимость характеристик системы наведения ТЗУ от величины передаточного отношения редуктора i_p и положим в математической модели $U_3(t) = U_{30}(t) = 1 \text{ В}$. Переходные процессы в системе наведения ТЗУ при нулевых начальных условиях уравнений (4) приведены на рис. 2.

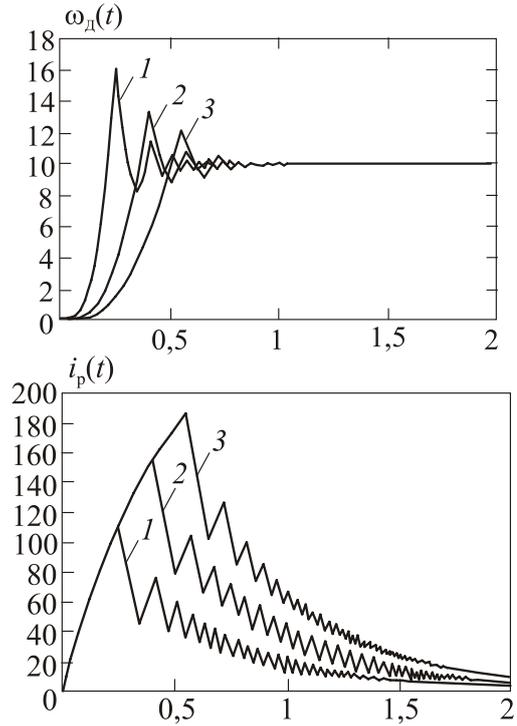


Рис. 2 – Переходные процессы в замкнутой системе: 1 – $i_p = 0,1$; 2 – $i_p = 0,2$; 3 – $i_p = 0,3$

Анализ процессов, приведенных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы: **1)** возрастание передаточного отношения редуктора приводит к повышению точности стабилизации заданной скорости вращения якоря исполнительного двигателя; **2)** возрастание передаточного отношения редуктора приводит к уменьшению быстродействия системы регулирования; **3)** возрастание передаточного отношения редуктора приводит к возрастанию энергетических затрат на управление.

Из сказанного выше следует, что выбор передаточного отношения редуктора, связывающего исполнительный электродвигатель с погонном командирской башенки должен осуществляться из условия компромисса между тремя показателями, характеризующими эффективность ТЗУ – точностью, быстродействием и энергетическими затратами [3].

В работе [2] показано, что интегральный квадратичный функционал

$$I_1 = \int_0^T \sigma^2(t) dt \quad (5)$$

может служить количественной мерой точности и быстродействия наведения, а функционал

$$I_2 = \int_0^T i_{\text{я}}^2(t) dt \quad (6)$$

может служить количественной мерой энергетических затрат на наведение.

Между сформулированными требованиями существуют элементы противоречия, поэтому невозможно обеспечить одновременное достижение минимумов функционалов (5) и (6).

Введем в рассмотрение аддитивный функционал

$$I = \beta_1^2 I_1 + \beta_2^2 I_2 = \int_0^T [\beta_1^2 \cdot \sigma^2(t) + \beta_2^2 \cdot i_{\text{я}}^2(t)] dt \quad (7)$$

весовые коэффициенты которого β_1 и β_2 подлежат выбору. Требуется выбрать значение постоянного коэффициента θ , при котором аддитивный функционал (7) достигает минимума.

Воспользовавшись результатами работы [4], для весовых коэффициентов β_1 и β_2 функционала (7) получаем следующие значения $\beta_1 = 0,83$; $\beta_2 = 0,17$. На рис. 3 приведена зависимость значений аддитивного функционала (7), вычисленных на решениях математической модели (1)-(4) при различных значениях постоянной величины

θ . Анализ рис. 3 приводит к выводу, что минимальное значение аддитивного функционала (7) достигается при выборе θ в интервале $0,01 \leq \theta \leq 0,1$.

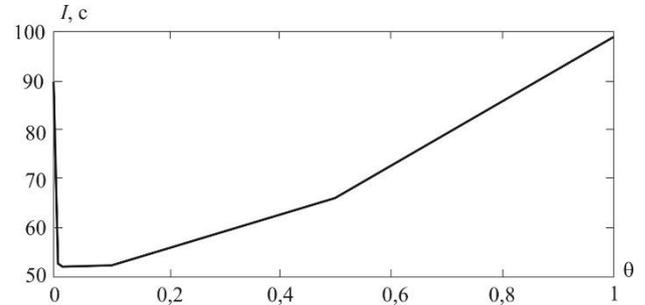


Рис. 3 – Зависимость функционала (7) от величины θ .

На рис.4 приведены переходные процессы в замкнутой системе наведения ТЗУ при различных значениях величины θ и при подаче на вход системы тестового задающего сигнала в виде:

$$U_3(t) = \begin{cases} 10t & \text{при } 0 \leq t \leq 1\text{с;} \\ 10 & \text{при } 1\text{с} \leq t \leq 3\text{с;} \\ 10 - 10(t - 3) & \text{при } 3\text{с} \leq t \leq 5\text{с;} \\ -10 + 10(t - 5) & \text{при } 5\text{с} \leq t \leq 6\text{с.} \end{cases}$$

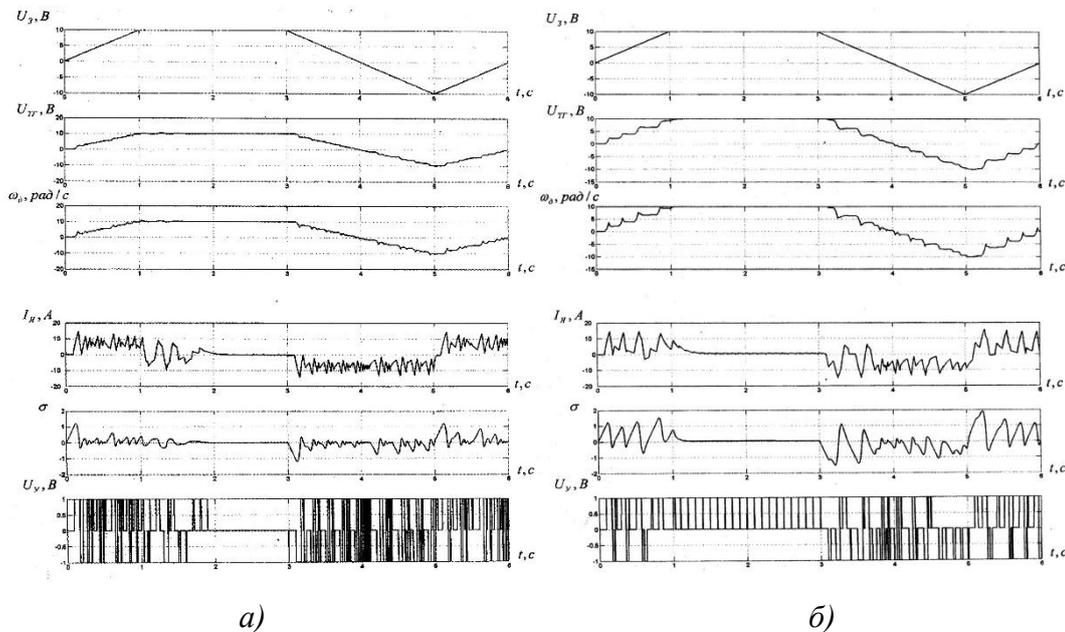


Рис. 4 – Переходные процессы наведения ТЗУ: а) $\theta = 0,05$; $T_0 = 0,01\text{с}$; б) $\theta = 0,3$; $T_0 = 0,01\text{с}$

Сравнение процессов на рис. 4 , приводит к выводу, что высокая точность наведения обеспечивается при

$\theta = 0,04 \in [0,01 \div 0,1]$. Вне интервала $[0,01 \div 0,1]$ точность наведения снижается.

На рис. 5 приведены переходные процессы в замкнутой системе наведения ТЗУ при различных значениях периода следования управляющих импульсов T_0 .

Сравнительный анализ этих рисунков позволяет сделать вывод о том, что возрастание величины T_0 приводит к

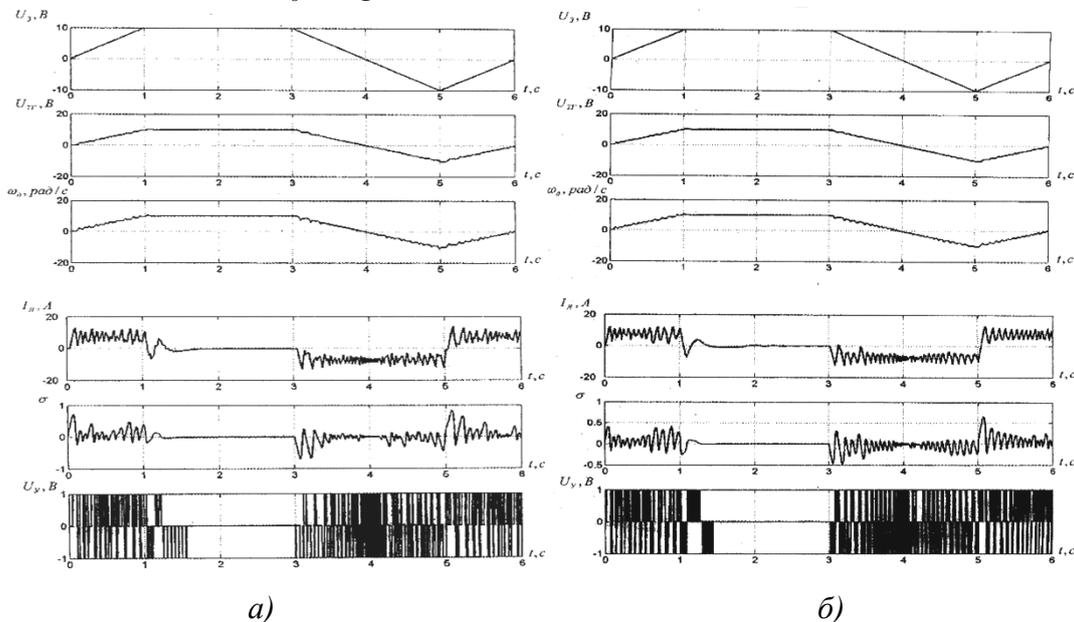


Рис. 5 – Переходные процессы наведения ТЗУ: а) $\theta = 0,03$; $T_0 = 0,02\text{c}$; б) $\theta = 0,03$; $T_0 = 0,05\text{c}$

Выводы. 1. Передаточное отношение редуктора, связывающего якорь исполнительного электродвигателя с погонном командирской башенки, следует выбирать на основе компромисса между точностью наведения ТЗУ, быстродействием и энергетическими затратами на наведение. 2. Сквозность управляющих импульсов, определяемая величиной θ , обеспечивает высокие динамические свойства замкнутой системы наведения ТЗУ при выборе величины θ в интервале $[0,01 \div 0,1]$. 3. Период следования управляющих импульсов T_0 , обеспечивающий высокую точность наведения и низкие энергетические затраты на наведение, не должен превышать величины $T_0 = 0,01\text{c}$.

Список литературы: 1. Александров Е. Е. Математическое моделирование динамических процессов в электроприводе импульсного регулирования танковой зенитной установки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник, С. А. Сладких // Вісник НТУ «ХПІ». – № 43. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – С. 61–63. 2. Александров Е. Е. Сравнительный анализ

снижению точности системы наведения и возрастанию энергетических затрат на наведение ТЗУ. Для обеспечения же высокой точности и низких энергетических затрат на наведение, период следования управляющих импульсов не должен превышать $0,01\text{c}$.

электронных систем импульсного регулирования танковой зенитной установки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник, С. А. Сладких // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – № 2. – С. 215–219. 3. Александров Е. Е. Параметрический синтез электромеханической системы наведения танкового зенитного пулемета / Е. Е. Александров, И. В. Костяник, С. А. Сладких // Вісник НТУ «ХПІ» – № 45. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2005. – С. 110–112. 4. Александров Е. Е. Выбор оптимизируемого функционала в задачах параметрического синтеза систем стабилизации / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – К. : КБ «Артиллерийское вооружение». – 2004. – № 2 (1). – С. 23–26.

Bibliography (transliterated):

1. Aleksandrov, Ye. Ye., T. Ye. Aleksandrova, I. V. Kostyanik and S. A. Sladkih. "Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektroprivode impulsnogo regulirovaniya tankovoy zenitnoy ustanovki."

Visnyk NTU "KhPI". No. 43. 2004. 61–63. Print.

2. Aleksandrov, Ye. Ye., T. Ye. Aleksandrova, I. V. Kostyanik and S. A. Sladkih. "Sravnitelniy analiz elektronnykh system impulsnogo regulirovaniya tankovoy zenitnoy ustanovki." *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. No. 2. 2004. 215–219. Print.

3. Aleksandrov, Ye. Ye., I. V. Kostyanik and S. A. Sladkih. "Parametricheskii sintez electromekhanicheskoy sistemy navedeniya tankovogo zenitnogo pulemeta." *Visnyk NTU "KhPI"*. No. 45. 2005. 110–112. Print.

4. Aleksandrov, Ye. Ye. and T. Ye. Aleksandrova. "Vybor optimiziruemogo funktsionala v zadachah parametricheskogo sinteza system stabilizatsii." *Artilleriyskoe i strelkovoe voozuzheniya*. No. 2(1). 2004. 23–26. Print.

Надійшла (received) 05.02.2015