

УДК 623.412

Т. Е. АЛЕКСАНДРОВА,

доктор технических наук

(Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
г. Харьков)

Идентификация коэффициента внутреннего трения материала ствола танковой пушки

Рассматривается методика нахождения коэффициента внутреннего трения материала ствола танковой пушки, включающая использование специального экспериментального стенда с последующим анализом расчетных и экспериментальных результатов.

Розглядається методика знаходження значення коефіцієнта внутрішнього тертя матеріалу ствола танкової гармати, що включає використання спеціального експериментального стенду з подальшим аналізом розрахункових і експериментальних результатів.

В работе [1] получена математическая модель возмущенного движения упругой танковой пушки, записанная в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, которая в результате использования метода Фурье приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$I_{\Pi} \ddot{\varphi}(t) - \sum_{i=1}^n a_i \Delta \ddot{T}_i(t) = M_c(t) + M_B(t); \quad (1)$$

$$a_i [\ddot{\varphi}_0(t) - \ddot{\varphi}(t)] + c_i \Delta \ddot{T}_i(t) + \zeta b_i \Delta \dot{T}_i(t) + b_i \Delta T_i(t) = k_i \ddot{z}_k(t); \quad (2)$$

где $\Delta T_i(t)$, $(i = \overline{1, n})$ – координаты, характеризующие упругие колебания ствола танковой пушки по каждому из n учитываемых тонов; $\varphi(t)$ – угол рассогласования условной недеформируемой оси канала ствола от линии прицеливания; $M_c(t)$ – стабилизирующий момент, приложенный к казенной части танковой пушки; $M_B(t)$ – внешнее возмущение, приложенное к пушке в процессе движения танка; $\varphi_0(t)$ – текущий угол поворота башни танка, определяемый кинематическим соотношением

$$\dot{\varphi}_0(t) = \dot{\varphi}_k(t) \cos \alpha(t) + \dot{\vartheta}_k(t) \sin \alpha(t), \quad (3)$$

$\alpha(t)$ – угол поворота башни относительно корпуса, отсчитываемый против часовой стрелки; $z_k(t)$, $\varphi_k(t)$, $\vartheta_k(t)$ – обобщенные координаты, характеризующие соответственно вертикальные, продольно-угловые и поперечно-угловые колебания подрессоренной части корпуса танка [2]; I_{Π} – момент инерции танковой пушки относительно оси цапф; a_i , b_i , c_i , k_i , $(i = \overline{1, n})$ – постоянные коэффициенты, определяемые геометрическими, массовыми и инерционными параметрами танковой пушки; ζ – коэффициент внутреннего трения материала ствола.

Материал ствола танковой пушки имеет весьма сложный состав, а собственно пушка в процессе изготовления подвергается многочисленным и сложным технологическим процессам обработки, обеспечивающим стабильные значения характеристик прочности, износостойкости и надежности. Для различных видов стали значение коэффициента внутреннего трения колеблется в широком диапазоне $\zeta = 0,002 \dots 0,009$. В то же время, решение задач синтеза систем наведения и стабилизации танковой пушки требует более точной оценки значения этого коэффициента.

Целью статьи является решение задачи идентификации значения коэффициента внутреннего трения материала ствола танковой пушки.

Описание экспериментального стенда. В процессе решения задачи идентификации для получения экспериментальных данных был создан исследовательский стенд на базе танка Т-64Б, схема которого изображена на рис. 1.

В качестве системы питания экспериментального стенда используется выпрямительный агрегат ВАКС-4,5-30. Такой агрегат преобразует трехфазный переменный ток напряжением 380 В и частотой 50 Гц в постоянный ток и используется для питания потребителей постоянным током напряжением до 30 В. Таким образом, агрегат

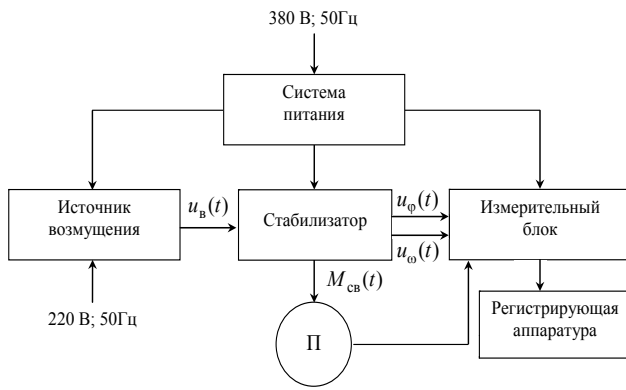


Рис. 1. Схема исследовательского стенда

ВАКС-4,5-30 имитирует работу аккумуляторных батарей и генератора постоянного тока системы электрооборудования танка.

Источник возмущения представляет собой генератор колебаний синусоидальной формы ГЗ-16 с максимальной амплитудой выходного сигнала 25 В и частотой от 0,01 Гц до 100 Гц. Генератор питается от промышленной электросети напряжением 220 В и частотой 50 Гц. С выхода источника возмущения синусоидальный электрический сигнал

$$u_B(t) = A \sin \omega t \quad (4)$$

подается на обмотку управления электромагнита электрогидравлического усилителя стабилизатора. При этом на выход стабилизатора формируется момент $M_{CB}(t)$, приложенный к пушке.

Измерительный блок получает с выхода электронного блока стабилизатора выпрямленные сигналы $u_\phi(t)$ и $u_\omega(t)$, а также содержит усилитель 8-АНЧ-7М, на входы которого попадают сигналы с выходов тензорезисторов, наклеенных на ствол танковой пушки. Тензорезисторы используются для измерения деформаций ствола танковой пушки, вызванных упругими колебаниями ствола. Схема наклейки тензорезисторов на ствол танковой пушки показана на рис. 2.

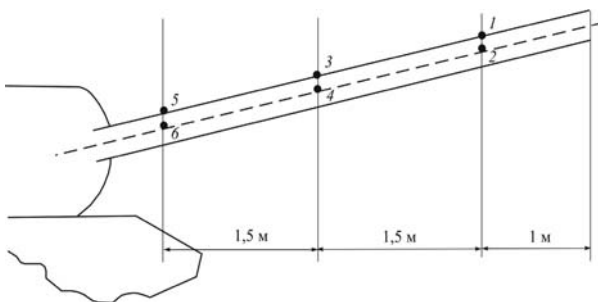


Рис. 2. Схема наклейки тензорезисторов

Сигналы с выходов измерительного блока поступают ко входам регистрирующей аппаратуры – светового осциллографа К-20-22, записывающего эти сигналы на светочувствительную фотоленту, которая перемещается с различными скоростями.

Таким образом, разработанный экспериментальный стенд работает на неподвижном танке, а

колебания поддресоренной части корпуса имитируются синусоидальными сигналами (4) с выхода источника возбуждения.

Решение задачи идентификации. На рис. 3 изображены осциллограммы процессов, регистрируемые с помощью осциллографа для различных частот сигнала возмущения (4).

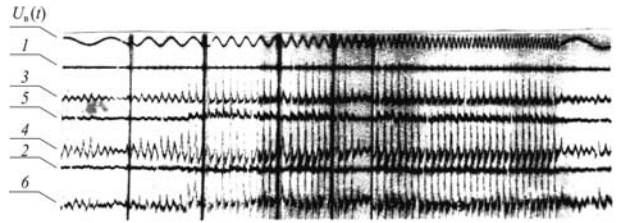


Рис. 3. Осциллограммы упругих колебаний ствола в канале вертикального наведения

Из анализа осциллограммы следует, что амплитуда упругих колебаний ствола возрастает с приближением возмущающей частоты ω к резонансной частоте 1-го тона упругих колебаний, которая составляет $\omega_{1p} = 10,136 \text{ с}^{-1}$.

Если предположить, что поддресоренная часть танка неподвижна, иными словами в математической модели (1) – (3) положить $\ddot{z}_k(t) = 0$, $\dot{\varphi}_k(t) = 0$, $\dot{\psi}_k(t) = 0$, то модель принимает следующий вид:

$$I_n \ddot{\varphi}(t) - \sum_{i=1}^n a_i \Delta \ddot{T}_i(t) = M_c(t) + M_B(t); \quad (5)$$

$$c_i \Delta \ddot{T}_i(t) + \zeta b_i \Delta \dot{T}_i(t) + b_i \Delta T_i(t) = a_i \ddot{\varphi}(t), \quad (6)$$

В математической модели (5), (6) будем учитывать лишь первый (основной) тон упругих колебаний ствола. В этом случае модель записывается в виде двух дифференциальных уравнений второго порядка каждое

$$I_n \ddot{\varphi}(t) - a_1 \Delta \ddot{T}_1(t) = M_c(t) + M_B(t); \quad (7)$$

$$c_1 \Delta \ddot{T}_1(t) + \zeta b_1 \Delta \dot{T}_1(t) + b_1 \Delta T_1(t) = a_1 \ddot{\varphi}(t). \quad (8)$$

Обе части дифференциального уравнения (8) разделим на коэффициент b_1 . Тогда уравнение (8) с учетом обозначений $T^2 = \frac{c_1}{b_1}$; $k_1 = \frac{a_1}{b_1}$ записывается в операторной форме

$$(T^2 p^2 + \zeta p + 1) \Delta T_1(t) = k_1 \ddot{\varphi}(t), \quad (9)$$

где p – символ дифференцирования.

Используя уравнение (9), запишем передаточную функцию упругой части ствола танковой пушки по первому тону упругих колебаний

$$W_1(s) = \frac{L\{\Delta T_1(t)\}}{L\{\ddot{\varphi}(t)\}} = \frac{k_1}{T^2 s^2 + \zeta s + 1}, \quad (10)$$

где $L\{\bullet\}$ – преобразование Лапласа функции времени $\{\bullet\}$; s – комплексная переменная преобразования Лапласа.

Рассмотрим амплитудно-частотную характеристику упругой части ствола по первому тону упругих колебаний. Для этого в соотношении (10) положим $s = j\omega$

$$W_1(j\omega) = \frac{k_1}{(1-T^2\omega^2) + j\omega\zeta}. \quad (11)$$

Частотную передаточную функцию (11) представим в виде суммы действительной и мнимой частей:

$$W_1(j\omega) = U_1(\omega) + jV_1(\omega),$$

где

$$U_1(\omega) = \frac{k_1(1-T^2\omega^2)}{(1-T^2\omega^2)^2 + \omega^2\zeta^2}; \quad V_1(\omega) = -\frac{k_1\omega\zeta}{(1-T^2\omega^2)^2 + \omega^2\zeta^2}.$$

Тогда амплитудно-частотная характеристика упругой части ствола по первому тону упругих колебаний

$$M_1(\omega) = \sqrt{U_1^2(\omega) + V_1^2(\omega)} = \frac{k_1}{\sqrt{(1-T^2\omega^2)^2 + \omega^2\zeta^2}}. \quad (12)$$

Резонансный пик амплитудно-частотной характеристики (12) соответствует минимуму по ω выражения под квадратным корнем. Продифференцируем это выражение по ω и результат дифференцирования приравняем к нулю. В результате получаем

$$2T^4\omega_{1p}^2 - 2T^2 + \zeta^2 = 0. \quad (13)$$

Расчетное значение резонансной частоты первого тона упругих колебаний ствола в соответствии с формулой (13)

$$\omega_{1p}^2 = \frac{2T^2 - \zeta^2}{2T^4}. \quad (14)$$

Таким образом, величина ζ может быть идентифицирована путем сравнения расчетного (14) и экспериментального значений резонансной частоты первого тона упругих колебаний ствола. Из соотношения (13) получаем

$$\zeta = \sqrt{2T^2 - 2T^4\omega_{1p}^2}. \quad (15)$$

В работе [3] получены числовые значения параметров математической модели (1), (2), в том числе $b_1 = 2,213 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$; $c_1 = 2,152 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2$. Тогда $T^2 = 0,0097 \text{ с}^2$. Значение резонансной частоты первого тона упругих колебаний ствола, полученные экспериментально, составляет $\omega_{1p} = 10,136 \text{ с}^{-1}$. В результате подстановки числовых значений величин T и ω_{1p} в формулу (15) получаем оценку значения коэффициента внутреннего трения материала ствола $\zeta = 0,0082$.

Заключение. Предлагаемая методика решения задачи идентификации значения коэффициента внутреннего трения материала ствола танковой пушки состоит в сравнении расчетного и экспериментального, полученного с помощью специально созданного исследовательского стенда, значений резонансной частоты первого тона упругих колебаний ствола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, Е. Е. Параметрический синтез цифровой системы стабилизации танковой пушки [Текст] / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Проблемы управления и информатики / Институт космічних досліджень НАН України та НКА України. – 2015. – № 6. – С. 5–20.
2. Борисюк, М. Д. Стохастическая оценка плавности хода многоопорного транспортного средства [Текст] / М. Д. Борисюк, Т. Е. Александрова, А. С. Мазманишвили // Доповіді НАН України. – 2013. – № 6. – С. 52–59.
3. Александрова, Т. Е. Упругая танковая пушка как стабилизируемый объект [Текст] / Т. Е. Александрова, А. Е. Истомин // Механіка та машинобудування / НТУ «ХПІ». – 2011. – № 2. – С. 178–183.

Рецензент Д. О. Волонцевич, д-р техн. наук, проф.
(Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»)