

7. Верификация проекта.

- Форма АЧХ получилась идеальной.
- Значение АЧХ на частоте среза, равной 1, соответ-

ствует значению коэффициента усиления $\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,707$.

- Значение частоты $\Omega_3 = 3$ соответствует значению $1/a_3^2 = 0,000625$.

8. Вывод по результату проектирования: полученные характеристики фильтра удовлетворяют требованиям технического задания, следовательно, коррекция результатов проектирования не требуется.

Таким образом, в работе предложена методика автоматизированного проектирования фильтров низкой частоты (ФНЧ) на примере фильтра Баттерворта. В методике объединены процедуры структурного

и параметрического синтеза ФНЧ на функциональном уровне, а также осуществлена верификация результатов проектирования. Данная методика может быть использована специалистами, занимающимися проектированием информационно-измерительных систем.

Библиографические ссылки

1. Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г. Справочник по активным фильтрам : пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
2. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб. : Питер, 2002. – 320 с.
3. Хьюлсман Л. П., Аллен Ф. Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров : пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1984. – 384 с.

V. A. Panov, PhD, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University

Method of Automated Design of Analog Filters at Functional Level

The paper proposes the technique of computer-aided design of low frequency filters(LFF) by the example of Butterworth filter. To verify design results the software MatLab was applied. This technique united procedures of LFF structural and parametric synthesis at the functional level.

Key words: filter, design, functional level, MatLab.

УДК 623.593

В. В. Коробейников, кандидат технических наук, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

В. С. Казаков, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ДОЗВУКОВАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ МИШЕНЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧКИ ПОПАДАНИЯ И СКОРОСТИ ПУЛИ

Рассматривается конструкция и математическая модель мишени, позволяющей определять для каждого выстрела координаты точки попадания и скорость пули.

Ключевые слова: акустика, мишень, координата, скорость, датчик.

Дозвуковая акустическая мишень предназначена для определения внешнебаллистических параметров пуль, скорость движения которых меньше 500 м/сек. Для пуль со скоростью движения по траектории больше этого значения применяются сверхзвуковые акустические мишени [1]. Дозвуковая мишень отличается от сверхзвуковой наличием формирователя возмущения [2], при пробивании которого пулей образуется звуковая волна, распространяющаяся от точки попадания (ТП) до акустических датчиков (далее датчиков) расположенных на несущем каркасе мишени. Для определения координат точек попадания используется время прохождения этой волны от ТП до датчиков, которое определяется с помощью цифрового виртуального запоминающего осциллографа (ВЗО) [3]. Датчики расположены на каркасе таким образом, что при любой ТП после

пролета пуль формирователя от воздействия волны сначала срабатывает стартовый датчик (рис. 1). Сигнал от стартового датчика запускает ВЗО на прием, оцифровывание и запись информации от других датчиков в память прибора, затем с помощью программы ПЭВМ информация из памяти прибора считывается и обрабатывается. В результате обработки этой информации определяется время от момента появления сигнала на выходе стартового датчика до момента появления сигнала на выходе каждого координатного датчика. Далее эти времена используются в системе уравнений, в результате решения которой определяются координаты ТП.

Математическая модель дозвуковой мишени для определения координат ТП получается из рассмотрения рис. 1 и представляет собой следующую систему уравнений:

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = a(t_i + t_0), \quad (1)$$

где (x_i, y_i, z_i) – координаты i -го датчика; (x_0, y_0, z_0) – координаты точки попадания; a – скорость звука в воздухе; t_i – время прохождения звуковой волны от ТП до i -го датчика, причем оно отсчитывается с момента срабатывания стартового датчика, и поэтому его значение меньше на величину t_0 ; t_0 – время прохождения звуковой волны от ТП до стартового датчика; $i = 1, \dots, n-1$; n – количество датчиков в мишени.

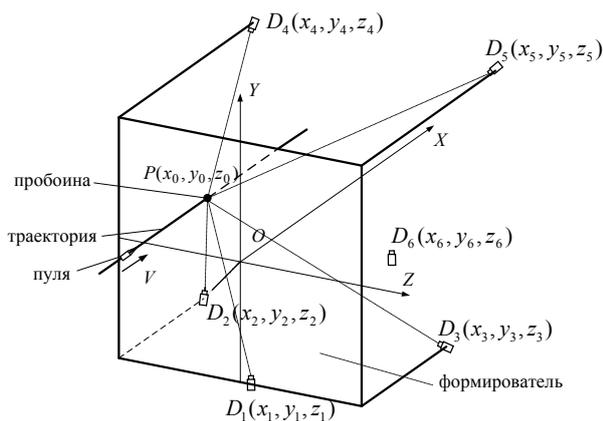


Рис. 1. Схема дозвуковой акустической мишени: $D_i(x_i, y_i, z_i)$ – акустический датчик; i – номер датчика; $P(x_0, y_0, z_0)$ – пробойна (точка попадания) с координатами x_0, y_0, z_0 ; V – скорость пули; $D_1(x_1, y_1, z_1)$ – стартовый датчик; $D_2(x_2, y_2, z_2), \dots, D_5(x_5, y_5, z_5)$ – координатные датчики; $D_6(x_6, y_6, z_6)$ – скоростной датчик

В этой системе датчик с номером n не используется, так как он находится за вторым формирователем (на рис. 1 он не показан) и предназначен для определения скорости пули. Неизвестными в (1) являются: t_0 – время прохождения звуковой волны от ТП до стартового датчика; (x_0, y_0, z_0) – координаты точки попадания.

Если плоскость регистрации совместить с плоскостью формирователя и от нее отсчитывать координаты x_i , то $x_0 = 0$. В этом случае количество неизвестных параметров равно трем. Скорость звука зависит от метеоусловий, поэтому, чтобы получить модель инвариантную к скорости звука, необходимо добавить ее в число неизвестных параметров. Количество датчиков должно быть равно или больше числа неизвестных. Примем $n = 6$, тогда количество координатных датчиков равно четырем (два других – это стартовый и скоростной).

Вычисленные по (1) координаты ТП содержат погрешности, так как координаты расположения датчиков точно нам не известны. Поэтому для повышения точности определения координат ТП используются поправки, и окончательно координаты вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} y &= y_0 + \Delta y, \\ z &= z_0 + \Delta z, \end{aligned} \right\}$$

где y_0, z_0 – вычисленные по (1) координаты ТП; $\Delta y, \Delta z$ – поправки.

Поправки вычисляются на основе регрессионной модели [4]. Например,

$$\left. \begin{aligned} \Delta y &= a_0 + a_1 y_0 + a_2 z_0 + a_3 y_0 z_0 + a_4 y_0^2 + a_5 z_0^2, \\ \Delta z &= b_0 + b_1 y_0 + b_2 z_0 + b_3 y_0 z_0 + b_4 y_0^2 + b_5 z_0^2, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где y_0, z_0 – вычисленные координаты по (1); a_j, b_j – коэффициенты; $j = 0, \dots, 5$.

Другим способом повышения точности определения координат ТП является идентификация координат расположения датчиков по данным специальных стрельб по бумажной мишени, которые состоят из измеренных вручную значений координат точек попадания и значений времен датчиков, соответствующих точкам попадания.

Для определения скорости движения пули на блокируемом отрезке траектории в мишени устанавливается второй формирователь, отстоящий от первого на определенном расстоянии, и за ним датчик. Схема такой мишени показана на рис. 2.

Математическая модель дозвуковой мишени для определения скорости получается из рассмотрения этого рисунка и в предположении, что траектория движения пули является прямой линией и параллельна оси ОХ. Если использовать показания только скоростного датчика, то скорость определяется из следующего выражения:

$$\frac{L}{V} + \frac{\sqrt{(x_6 - L)^2 + (y_6 - y_0)^2 + (z_6 - z_0)^2}}{a} = t_6 + t_0, \quad (3)$$

где L – расстояние между формирователями; V – скорость движения пули; (x_6, y_6, z_6) – координаты скоростного датчика; (y_0, z_0) – координаты точки попадания; a – скорость звука в воздухе; t_6 – время прохождения звуковой волны от ТП во втором формирователе до скоростного датчика; t_0 – время прохождения звуковой волны от ТП в первом формирователе до стартового датчика.

Разрешая (3) относительно V , получим:

$$V = \frac{aL}{a(t_6 + t_0) - \sqrt{(x_6 - L)^2 + (y_6 - y_0)^2 + (z_6 - z_0)^2}}, \quad (4)$$

где координаты точки попадания (y_0, z_0) и значение t_0 определяются из решения системы (1); a считается величиной известной или также определяется из решения системы (1).

Если использовать время скоростного и какого-нибудь координатного датчиков, то скорость определяется из выражения

$$\frac{L}{V} + \frac{\sqrt{(x_6 - L)^2 + (y_6 - y_0)^2 + (z_6 - z_0)^2}}{a} - \frac{\sqrt{(x_j^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2)}}{a} = t_6 - t_j, \quad (5)$$

где x_j, y_j, z_j – координаты j -го датчика; t_j – время прохождения звуковой волны от ТП в первом формирователе до j -го датчика; $j = 2, \dots, n-1$ – номер координатного датчика.

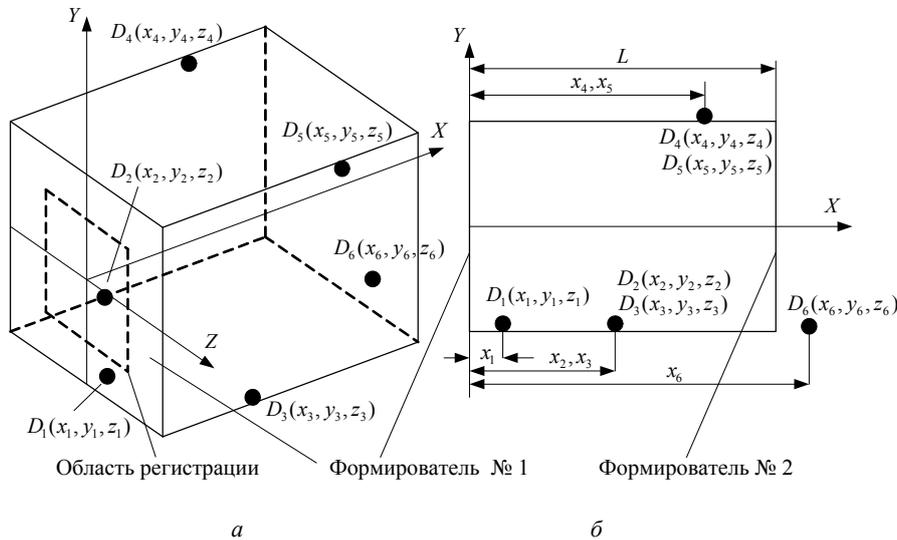


Рис. 2. Дозвуковая акустическая мишень для измерения координат ТП и скорости пули: а – общий вид мишени; б – вид сбоку

Разрешая (5) относительно V , получим:

$$V = \frac{aL}{a(t_6 - t_j) - \left\{ \sqrt{(x_6 - L)^2 + (y_6 - y_0)^2 + (z_6 - z_0)^2} - \sqrt{x_j^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2} \right\}}. \quad (6)$$

Повысить точность вычисления скорости можно путем усреднения значений, полученных по (6) для каждого координатного датчика.

На точность определения скорости влияют погрешности в задании координат расположения координатных и скоростного датчиков, расстояния между формирователями, а также потери в скорости пули при пробивании ей формирователей. Уменьшение указанных погрешностей достигается в результате решения отмеченной выше задачи идентификации координат расположения датчиков и расстояния между формирователями по измеренным координатам точек попадания по бумажной мишени и времени срабатывания датчиков. Потери в скорости пули при пробивании ей формирователей компенсируются коэффициентом согласования, который равен отношению

$$k = \frac{V_{sv}}{Vak}, \quad (7)$$

где V_{sv} – средняя скорость по серии выстрелов, для которых скорость пули определяется, например, с помощью световой мишени, которая не создает помех для движения пули по траектории и расположена таким образом, чтобы середина блокируемого отрезка совпадала с серединой блокируемого отрезка у акустической мишени, или другим штатным методом при соблюдении этих требований, т. е. расстояние от дульного среза до середины блокируемо-

го отрезка траектории была равна (8); Vak – средняя скорость по серии выстрелов, выполненных теми же пулями и из того же стрелкового оружия, определенная с помощью дозвуковой акустической мишени, и которая соответствует дальности

$$L^* = L_{f1} + \frac{L}{2}, \quad (8)$$

где L^* – дальность, равная расстоянию от дульного среза оружия до середины блокируемого участка траектории и к которому соотносена скорость Vak ; L_{f1} – дальность расположения первого формирователя относительно дульного среза; L – расстояние между формирователями.

В рабочем режиме работы мишени скорость пули вычисляется по формуле

$$V^* = kV,$$

где V^* – скорректированное значение скорости движения пули; k – коэффициент согласования; V – значение скорости, вычисленное по (4) или по (6).

Коэффициенты a_j, b_j в (2) определяются на этапе настройки мишени, при этом используются координаты ТП, вычисленные по (1) и измеренные вручную по бумажной мишени.

Коэффициент согласования (7) также определяется на этапе настройки мишени и требует временного

развертывания на месте расположения акустической мишени другой блокирующей аппаратуры, которая не мешает движению и не создает потерь энергии пули, удовлетворяет требованиям равенства дальности от дульного среза до средней точки блокировки и позволяет определять скорость пули.

Экспериментальные исследования дозвуковой акустической мишени подтвердили адекватность приведенных выше математических моделей исследуемому объекту, т. е. значения вычисленных координат ТП и скорости движения пули с помощью мишени соответствовали реальным значениям для каждого выстрела.

Таким образом, исследования показывают, что для испытаний изделий с дозвуковой скоростью движения пули можно применить ИИС, построенную на дозвуковой акустической мишени, которая дает возможность для одного выстрела одновременно определять не только координаты точки попадания, но и скорость движения пули на дальности ус-

тановки мишени. К недостаткам этой мишени можно отнести наличие расходного материала (формирователей). Преимуществом является низкая стоимость по сравнению со световой мишенью.

Библиографические ссылки

1. Пат. 2392577 Российская Федерация, МПК F41 J 5/06. Устройство определения внешнебаллистических параметров на основе акустических датчиков / Афанасьев Н. Ю., Афанасьев В. А., Веркиенко Ю. В., Коробейников В. В.; заявитель и патентообладатель Институт прикладной механики УРО РАН. – № 2008129855/02; заявл. 18.07.2008; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17-ил.

2. Коробейников В. В. Модель дозвуковой акустической мишени // Вестник ИжГТУ. – 2011 – № 1. – С. 100–102.

3. URL: <http://www.lcard.ru/info/news>

4. Коробейников В. В., Казаков В. С. Выбор конструкции дозвуковой акустической мишени для физической модели информационно-измерительной системы // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1(49). – С. 185–190.

V. V. Korobeynikov, PhD, Institute of Mechanics of the Ural Branch of RAS, Izhevsk

V. S. Kazakov, PhD, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Subsonic Acoustic Target for Measurement of Hit Point Coordinates and Bullet Speed

The paper considers the layout and mathematical model of the target, allowing to define hit point coordinates and bullet speed for each shot.

Key words: acoustics, target, coordinate, speed, sensor.

УДК 621.385.833

П. В. Гуляев, кандидат технических наук, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

Е. Ю. Шелковников, доктор технических наук, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

А. В. Тюрников, кандидат физико-математических наук, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

С. Г. Селетков, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Н. И. Осипов, кандидат технических наук, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

С. Р. Кизнерцев, кандидат технических наук, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ИНЕРЦИОННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Исследованы вопросы приема и обработки данных с магнитоиндукционного датчика скорости линейных перемещений, интегрированного в инерционный пьезоэлектрический привод. Описаны его конструкция, работа, приведены временные диаграммы. Рассмотрены присущие этому датчику особенности помех, предложены средства их подавления и компенсации.

Ключевые слова: инерционный пьезопривод, магнитоиндукционный датчик скорости, помехоустойчивость, фильтрация, обработка сигналов.

В настоящее время инерционные пьезоэлектрические приводы находят широкое применение для высокоточного позиционирования образцов и зондов [1, 2, 3]. Наибольшей точностью перемещений обладают инерционные пьезоприводы вращательно-поступательного типа, позволяющие осуществлять высокоточные угловые перемещения и преобразовывать их в сверхмалые (единицы нм)

линейные перемещения [4, 5, 6]. Однако их использование в системах позиционирования с координатной привязкой [7] ограничивается необходимостью постоянного мониторинга величины и скорости перемещений. Для выполнения такого мониторинга без существенного усложнения системы позиционирования используются недорогие магнитоиндукционные датчики скорости перемещений, органично вписывающиеся