

УДК 533.6.013.124

В.В. ФАРАПОНОВ, Н.В. САВКИНА, А.С. ДЬЯЧКОВСКИЙ, А.В. ЧУПАШЕВ

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ С БОЛЬШИМ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ¹

Целью баллистического эксперимента является определение изменения во времени линейных и угловых координат летящих моделей. Описана лабораторная установка и область её применения, также приведены результаты экспериментов в табличной форме.

Ключевые слова: установка лабораторная, движение тел, скорость, баллистический коэффициент.

Проведение любого внешнебаллистического эксперимента подразумевает определение одной или несколько аэродинамических характеристик. Чаще всего, требуется знание аэродинамического коэффициента лобового сопротивления. Для этого трассы, на которых проводятся такие эксперименты, оснащаются регистрационной и измерительной аппаратурой [1, 2], позволяющей производить определение кинематических параметров и времен, соответствующих моментам регистрации данных параметров. На кафедре динамики полета физико-технического факультета Томского государственного университета постоянно ведется работа по модернизации такой аппаратуры для баллистической трассы [3]. Особенностью кафедральной трассы можно считать методическую направленность проводимых экспериментов. Это объясняет использование в качестве метательных установок стандартных пневматических устройств с начальными скоростями до 400 м/с и длину трассы с рабочей частью 2 м. Часто в экспериментальной практике требуется измерение только линейной скорости метаемого тела. Поэтому при проведении таких опытов ограничиваются использованием регистраторов пролетов определенных сечений. Скорость при этом вычисляется отношением измеренного расстояния между этими сечениями ко времени, за которое тело пролетает данный путь. Описываемая баллистическая трасса имеет в своем составе четыре бесконтактных блокирующих сечения. Измерительная аппаратура позволяет определить время пролета телом между 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 1 и 4 блокирующими сечениями и вычислить соответствующие этим участкам скорости V_1 , V_2 , V_3 и V_4 . На рис. 1 схематично показаны точки трассы, в которых измеряются скорости.

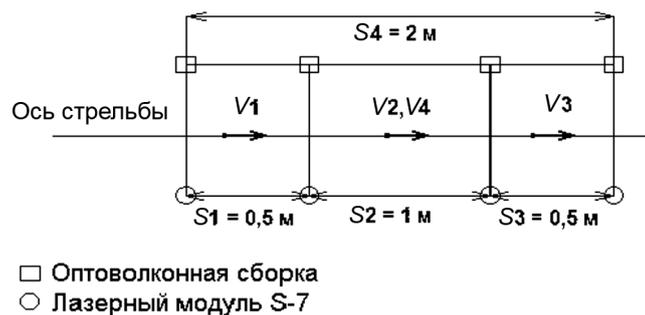


Рис. 1. Точки измерения скоростей на трассе

Таким образом, скорости V_2 и V_4 должны иметь одинаковое значение, так как они измеряются в одной точке траектории, но на разных базах. Отличие данных скоростей характеризует погрешность измеряемой средней скорости.

В состав регистраторов момента пролета тела определенного сечения (рис. 2) входит лазерный модуль «S-7» 1, создающий освещенную полуплоскость 2 толщиной около 1 мм, и световодной сборки 5, преобразующей линейную приемную часть в жгут определенного диаметра. Толщи-

¹ Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

на линейной части световода 0,5 мм. Регистраторы изготовлены на кафедре динамики полета. Пятилетняя их эксплуатация позволяет говорить о надежности их работы с телами, калибр которых составляет 4,5 мм. При пересечении телом 3 плоскости регистрации блокирующего устройства создается затенение 4 в приемной части световодной сборки, фиксируемое фотодиодом, находящимся на конце световодного жгута 6. Лазерный модуль «S-7», в отличие от стандартных микро-мощных лазеров, имеет специальную линзу, которая формирует световую полуплоскость, направленную таким образом, чтобы она полностью засвечивала линейку из световодов. Линейка из световодов представляет собой разобранный с одной стороны оптоволоконный кабель, волокна которого уложены тонким слоем вдоль металлических пластин, плотно скрепленных друг с другом. Другой, неразобранный конец оптоволоконного кабеля удобен для подключения к нему фоторегистрирующего устройства (фотодиода). В регистраторах используется фотодиод марки «BPW34» производства фирмы «Vishay», обладающий достаточно большой светочувствительной поверхностью равной 7,5 мм² и малым временем нарастания напряжения (100 нс).

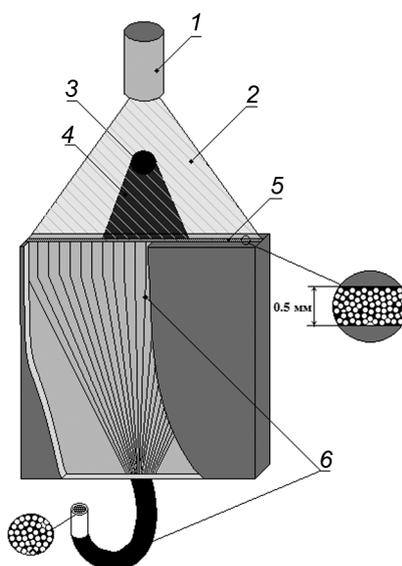


Рис. 2 Оптическая схема регистратора: 1 – лазерный модуль; 2 – полуплоскость, излучаемая лазером; 3 – метаемое тело; 4 – область перекрытия; 5 – линейка, состоящая из оптоволокон; 6 – оптоволоконка

На рис. 3 приведена блок-схема регистрации сигналов, полученных с фотодиодов, их последующей обработки и записи.

Модуль усиления сигнала состоит из двух каскадов на ОУ TL072. Полный коэффициент усиления каскадов равен 100. Необходимость применения двух каскадов обусловлена тем, что этот тип операционного усилителя даёт значительный сдвиг по фазе на рабочей частоте при коэффициенте усиления больше чем в 15 раз. Входной контур первого каскада представляет собой простейший фильтр высоких частот. Это необходимо для исключения влияния интенсивности внешней фоновой засветки на конечный результат. Далее, сигнал поступает на неинвертирующий вход первого операционного усилителя, где происходит десятикратное усиление сигнала. Затем, через делительный резистор, сигнал поступает на инвертирующий вход второго операционного усилителя, где, собственно, инвертируется и усиливается ещё в 10 раз. Инверсия сигнала служит для удобства визуализации полученных сигналов, наблюдаемых на клеммах выходов аналоговых сигналов. Стабилизация питания усилителя достигается с помощью фильтров по положительной и отрицательной шине. Конденсаторы ёмкостью 0,1 мкФ установлены непосредственно на ногах питания операционного усилителя. Схемы модулей усиления сигнала были реализованы на односторонней печатной плате. Сама плата помещена в экранированный от внешних электромагнитных помех корпус.

Для управления параметрами эксперимента, регистрации сигналов, обработки данных и визуализации результатов или параметров опыта служит «модуль обработки сигналов». Создан этот модуль на базе двух микроконтроллеров: «АТmega8» и «АТmega16» [4]. В процессе работы эти



Рис. 3. Блок-схема системы регистрации и обработки сигналов с применением микроконтроллеров

микроконтроллеры непрерывно «общаются» друг с другом и распределяют информационную нагрузку. Прибор был оснащен двумя микропроцессорами из-за обилия внешних управляющих и визуализационных компонентов. На «АТmega8» лежит задача регистрации сигналов от летящих объектов, измерения соответствующих времен и обработки полученных данных, а также задачи, связанные с установкой порога компаратора и его контролем. В свою очередь, «АТmega16» берет на себя задачи форматирования и визуализации данных, а также все остальные задачи двухсторонней связи с пользователем.

Для индикации порогового значения компаратора, на лицевой панели прибора выведен 3-разрядный 7-сегментный динамический индикатор. Так как для свечения одного сегмента на индикаторе требуется ток не менее 25 мА, то непосредственно с ног микроконтроллера управлять им не рекомендуется, в силу ограничения нагрузки на порт 50 мА. Для управления 3-разрядным 7-сегментным индикатором было решено разработать специальный драйвер. Непосредственно под данную модель индикатора, «BA56-12RWC», была разработана схема управления, позволяющая маломощным портам микроконтроллера управлять значительной нагрузкой. Для экономии портов процессора в схеме использована интегральная микросхема «CD4511», представляющая собой преобразователь двоично-десятичного кода в 7-сегментный, для индикаторов с общим катодом. Когда на базу одного из управляющих транзисторов подаётся управляющий сигнал, то он открывается и «прижимает» соответствующий катод индикатора к «земле». Далее, микроконтроллер формирует двоичный код необходимой цифры на входах управляющей микросхемы, а та, в свою очередь, формирует необходимую комбинацию на анодах индикатора, соответствующую закодированной в двоичном коде цифры. Печатная плата драйвера для управления 7-сегментным индикатором изготовлена на односторонней печатной плате из фольгированного текстолита. Индикатор установлен непосредственно на самой печатной плате драйвера. Сама плата крепится к корпусу прибора так, чтобы индикатор входил в специально проделанное для него отверстие.

Для обеспечения стабильной работы микропроцессоров на схеме предусмотрены дополнительные пассивные аналоговые компоненты. Для стабилизации питания и защиты от перенапряжения и переполюсовки в схеме предусмотрен стабилизатор напряжения «7805L». Он ограничивает питание схемы на уровне 5В.

Для подключения внешних пользовательских компонентов, индикации и управления на плате предусмотрены разъемы для следующих устройств:

- Инкрементального энкодера, который служит для регулировки порога срабатывания компаратора и для настройки расстояний между бесконтактными блокирующими сечениями. Настройка осуществляется посредством вращения пользователем вала энкодера.

- Жидкокристаллического дисплея, марки «WH2004», производства фирмы «WINSTAR». Он представляет собой четырехстрочный монохромный символьный дисплей с 20-ю символами на каждой строке и служит для отображения пользовательского меню, настроек и для визуализации результатов эксперимента.

- Драйвера управления трехразрядным семисегментным динамическим индикатором, на котором отображается текущий уровень порога компаратора.

- Красных индикаторных светодиодов на панели прибора. Эти светодиоды находятся по одному над каждой парой выходных клемм, расположенных на лицевой панели прибора. Каждый светодиод сигнализирует о регистрации пролетевшего тела соответствующим бесконтактным блокирующим сечением.

- Внутрисхемного программатора для записи специального программного обеспечения в микроконтроллер «ATmega8».

- Внутрисхемного программатора для записи специального программного обеспечения в микроконтроллер «ATmega16» и для подключения четырёх кнопок, которые предназначены для навигации по пользовательскому меню на жидкокристаллическом дисплее.

Плата модуля обработки сигналов изготовлена на односторонней печатной плате. На этой плате уделено немало внимания на совмещение аналоговых и цифровых компонентов и уменьшения их влияния друг на друга. Поэтому аналоговые дорожки, будучи более уязвимые к электромагнитным наводкам, получили больший приоритет при разводке и проведены как можно короче и дальше от цифровых линий. Кроме того, шины питания проводились «звездой», а также плата была максимально залита аналоговой «землёй».

На рис. 4 представлен общий вид модуля регистрации трассы. После его включения на жидкокристаллическом дисплее появится пользовательское меню и должен загореться красным цветом 3-разрядный 7-сегментный индикатор, показывая какое-либо число. После этого к клеммам на передней панели можно подключить необходимое оборудование, верхний ряд – выходы аналоговых сигналов, нижний ряд – выходы цифровых синхронизирующих сигналов.



Рис. 4. Общий вид модуля регистрирующей аппаратуры

С помощью кнопок управления « \wedge » и « \vee », расположенных под дисплеем, выбрать необходимый пункт меню и нажать «Ввод». Если необходимо поменять длину базовых расстояний, то в пользовательском меню нужно выбрать пункт «НАСТРОЙКИ», далее, с помощью кнопок управления можно выбрать необходимую базу и нажать кнопку «Ввод». После этого на дисплее появится выбранная база, длину которой, с помощью ручки энкодера, можно изменять. Если необходимое значение длины базы установлено, нужно нажать «Ввод», и новые данные о расстоянии между блокирующими сечениями запишутся в энергонезависимую память прибора. С помощью кнопки «Отмена» можно покинуть меню настроек и вернуться в исходное пользовательское меню.

Непосредственно перед началом опыта, с помощью ручки энкодера нужно выставить пороговое значение компаратора.

Для начала опыта нужно выбрать пункт «НАЧАТЬ ОПЫТ» и нажать кнопку «Ввод». На экране появится надпись «ОЖИДАНИЕ ВЫСТРЕЛА», что сигнализирует о том, что прибор готов к регистрации. После выстрела на лицевой панели прибора должны загореться сигнальные светодиоды. Их количество сигнализирует о том, какие сечения зарегистрировали метаемое тело. Если загорелись не все четыре сигнальных светодиода, это значит, что ось стрельбы не совпадает с серединой сечений блокирующих устройств и требуется дополнительная коррекция этой оси. При этом нужно нажать кнопку «Отмена», и прибор вернется в исходное состояние. Если регистрация прошла успешно и все сигнализирующие светодиоды загорелись, то на дисплее высветится уже рассчитанное значение скоростей метаемого тела на четырёх базах (рис. 5). Если интересует время пролёта телом каждой базы, то нажмите кнопку « \vee », и на экране покажется время в микросекундах. Чтобы снова вернуться к скоростям, необходимо нажать кнопку « \wedge ». После того, как резуль-

тат получен, нажатием кнопки «Отмена» прибор переводётся в исходное состояние, где снова можно откорректировать значения расстояний или порог компаратора.

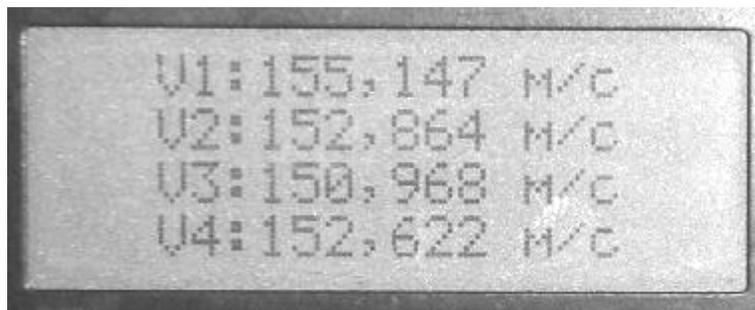


Рис. 5. Пример отображения полученных скоростей на дисплее

На рис. 6 и 7 представлены фотографии двух метаемых тел. Кривые 1 были получены при пролете телами четвертого блокирующего сечения, для чего использовался один из выходов аналоговых сигналов. Второй луч (кривые 2) осциллографа фиксировал сигнал с соответствующего выхода импульса синхронизации при опорном напряжении 0,5 В.

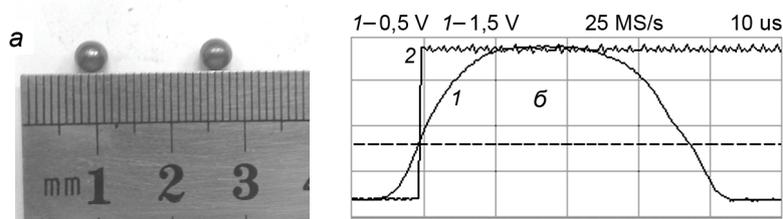


Рис. 6. Фотография сферической пули (а); осциллограммы аналогового сигнала от нее (кр. 1) и импульса синхронизации (кр. 2) при скорости $V = 123,3$ м/с (б)

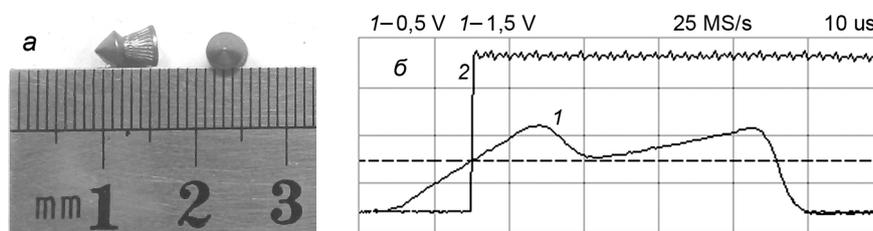


Рис. 7. Фотография пули (а); осциллограммы аналогового сигнала от нее (кр. 1) и импульса синхронизации (кр. 2) при скорости $V = 142,6$ м/с (б)

По рисункам видно, что формы полученных аналоговых сигналов повторяют профиль метаемого элемента. Амплитуды сигналов составляют 1–2,5 В. На рис. 7 нарастание сигнала соответствует острому носу пули, затем идет уменьшение величины сигнала, что соответствует прогибу в пуле. Плавное уменьшение сигнала на осциллограмме от плоского заднего торца пули объясняется прохождением им по толщине блокирующей плоскости (см. рис. 2). При такой скорости задняя кромка пули пролетит это расстояние за ~ 4 мкс, что и зарегистрировано на осциллограмме.

Применение описанной системы регистрации сигналов позволило повысить точность измеряемых временных промежутков не только за счет высокой частоты несущего генератора (16 МГц), но и за счет контроля момента подачи синхроимпульса, связанного, с одной стороны, с формой тела, а с другой – с величиной устанавливаемого порога срабатывания.

Измерение расстояний между блокирующими плоскостями осуществляется с помощью лазерного дальномера. Во время монтирования трассы в горизонтальной плоскости, проходящей через ось стрельбы, была закреплена оптическая скамья. При измерении расстояний используется кронштейн с закрепленным в нем отражателем и меткой. Кронштейн перемещается по оптической скамье до точки, пока луч блокирующей плоскости не попадет на метку. При этом кронштейн

фиксируется на оптической скамье и проводится измерение расстояния от закрепленного на оси трассы дальномера до отражателя. Затем кронштейн перемещается в следующую блокирующую плоскость, проводится измерение и т.д. Обычно проводится 10 измерений в каждой точке, вычисляются средние значения и записываются в память микроконтроллера. При этом относительная погрешность измерений расстояний между блокирующими плоскостями не превышает 0,05 %. Погрешности измерения расстояний с учетом оценки погрешности за счет не параллельности блокирующих сечений составляют 0,15 % [5].

В таблице представлены некоторые результаты экспериментов. В первой графе указаны условные номера различных форм стандартных пуль для пневматического ружья, во второй – количество проведенных экспериментов для данной формы пули. В последующих четырех графах указаны скорости, полученные в результате эксперимента. В следующей графе указаны значения средних скоростей. В последних двух графах приведены средние значения коэффициента силы лобового сопротивления по серии экспериментов и его относительное среднеквадратическое отклонение в серии.

Форма пули	Кол-во опытов	Масса, кг·10 ⁻³	$V1_{cp}$, м/с	$V2_{cp}$, м/с	$V3_{cp}$, м/с	$V4_{cp}$, м/с	V_{cp} , м/с	Ошибка V_{cp} , %	C_x ср	dC_x , %
1	88	0,303	168,6	165,90	163,6	166,00	165,95	0,06	0,48	8,1
2	25	0,498	106,0	105,32	104,0	105,17	105,24	0,14	0,66	7,2
3	25	0,501	131,1	130,75	130,1	130,68	130,72	0,05	0,36	5,7
4	22	0,673	89,20	89,07	88,79	89,04	89,05	0,04	0,31	7,8
5	25	0,674	106,4	105,81	105,8	105,98	105,89	0,16	0,46	8,6

По результатам проведенной серии экспериментов можно сделать выводы о работоспособности данной баллистической установки для проведения лабораторных исследований движения тел с большим баллистическим коэффициентом. Наличие бесконтактных (оптических) регистрирующих сечений позволяет измерять скорость метаемых элементов, не внося изменение в траекторию их движения. Четыре сечения позволяют не только измерить скорость центра масс тела с относительной погрешностью 0,16, но и вычислить значение коэффициента лобового сопротивления. Для данной конфигурации баллистической трассы, с учетом метания тел с большим баллистическим коэффициентом, значения C_x можно рассчитывать различными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костров А. В. Измерения и идентификация движения. – М.: МО СССР, 1986. – 394 с.
2. Дьячковский А. С., Фарапонов В. В. // Современная баллистика и смежные вопросы механики: материалы ВНК. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – С. 77–78.
3. Дьячковский А. С., Фарапонов В. В., Чупашев А. В. // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: материалы ВНК. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2011. – С. 152–153.
4. Ревич Ю. В. Практическое программирование микроконтроллера Atmel AVR на языке ассемблера. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 384 с.
5. Дьячковский А. С., Перминов И. П., Фарапонов В. В., Чупашев А. В. // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: материалы ВНК. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2011. – С. 152–153.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: fff@ftf.tsu.ru

Поступила в редакцию 10.07.12.

Фарапонов Валерий Владимирович, к.ф.-м.н., доцент;
Савкина Надежда Валерьевна, аспирант;
Дьячковский Алексей Сергеевич, аспирант;
Чупашев Андрей Владимирович, инженер.