

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 623.593; 681.31; 004.021
DOI 10.22213/2410-9304-2017-4-21-28

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент
Институт механики УрО РАН
А. Ю. Вдовин, кандидат технических наук, доцент
Е. М. Марков, кандидат технических наук, доцент
Т. Е. Шелковникова, магистрант
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ

Приведены результаты исследований по разработке лазерных экранов электронных оптических мишеней для стрелкового оружия на кафедре «Вычислительная техника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова и в Институте механики УрО РАН. Электронные оптические мишени, отличающиеся высокими точностными и помехоустойчивыми свойствами, но вместе с тем громоздкостью конструкции, высоким энергопотреблением и трудоемкостью настройки, широко используются для испытания и диагностики стрелкового и артиллерийского оружия на производствах и военных приемках, улучшение их эксплуатационных свойств является актуальной задачей. Исследованы варианты конструкции лазерных экранов с использованием зеркальных решеток и лазерных плоскостей. Сначала проведен выбор фотодиодов для оптических датчиков и режимы их работы исходя из соотношения сигнал/шум и длительности фронта сигнала. Далее исследованы параметры лазерной зеркальной решетки, выявлены такие недостатки, как существенное ослабление лазерного луча при многократном отражении, трудоемкость механической настройки решетки и наличие «мертвых зон» в призеркальных областях. Но ограничение размеров зоны регистрации позволяет все же использовать лазерные зеркальные решетки для частных случаев испытаний. Также исследована лазерная плоскость на базе лазерного уровня. Исходя из малого уровня полезного сигнала необходимо использовать целевые диафрагмы, оптическую систему и электронную схему усиления. Усложнение конструкции лазерной плоскости позволило получить лучшее соотношение сигнал/шум, но оптическая система и параметры лазерного уровня также ограничивают размеры зоны регистрации меньшими значениями, чем у лазерной зеркальной решетки. Приведены результаты экспериментальных испытаний лазерных экранов. Сделан вывод о перспективности дальнейших исследований и усовершенствований оптических мишеней с целью расширения их сфер использования и снижения себестоимости.

Ключевые слова: оптическая мишень, фотодиод, лазерная плоскость, лазерная зеркальная решетка, измерительная система.

Электронные оптические мишени, разработкой и исследованием которых занимались в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова и в Институте механики УрО РАН более 35 лет, применяются в структурах МО РФ для военной приемки или на производстве для определения параметров кучности и точности стрелкового оружия и скорости боеприпаса на произвольных рубежах. Оптические мишени (рис. 1) состоят из последовательного ряда смонтированных на определенной дальности световых экранов ($\mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_3$) – плоскостных излучателей света ($I_0 - I_3$) и светочувствительных датчиков-приемников ($D_0 - D_3$), играющих роль блокирующих устройств для замера времени пролета объекта, и за счет определенной пространственной конфигурации плоскостей (углы α и β) и линейной математической модели, позволяющих вычислять координаты попадания [1, 2].

Такие мишени характеризуются высоким энергопотреблением, громоздкостью конструкции, сложностью монтажа и настройки, но отличаются высокой точностью и быстродействием, отсутствием расходных материалов и отсутствием воздействия на объект измерения. Оптические мишени отличаются высокой помехоустойчивостью (в условиях светоизоляции), возможностью проведения испытаний как при сверхзвуковых, так и дозвуковых скоростях объекта, практической независимостью от свойств внешней среды (например, температуры и влажности воздуха, ветра).

Для выполнения частных задач анализа внешней баллистики (например, определение начальной скорости пуль пневматического оружия) предлагается использовать конструктивно простые световые экраны на базе лазерных излучателей [3–6], исследованием которых и посвящена данная статья.

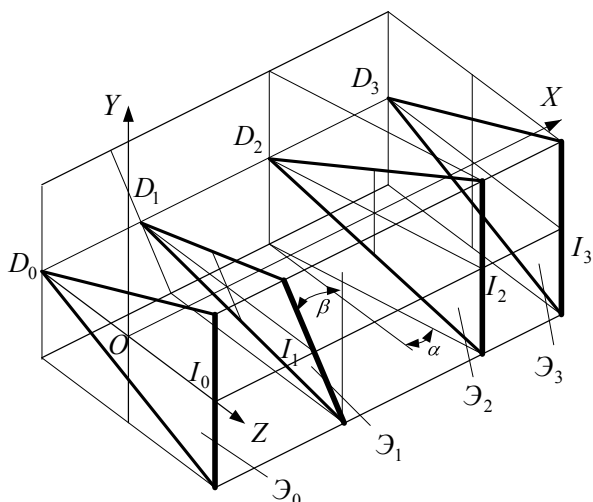


Рис. 1. Конструкция оптической мишени

Так, в качестве датчика начала отсчета (ДНО), размещаемого непосредственно перед дульным срезом, можно использовать конст-

рукцию, включающую в себя простой бытовой лазерный излучатель (ЛИ) и фотодиод (ФД). Для измерения скорости необходима достаточная измерительная база между двумя световыми (лазерными) экранами, но, как правило, не более полуметра, а на таком расстоянии уверенно «попасть» в один лазерный луч является задачей трудоемкой, поэтому исследуются два варианта конструкции второго экрана: лазерная зеркальная решетка (ЛЗР) с ФД и лазерная плоскость (ЛП) с оптическим датчиком (ОД) [7].

В качестве пневматического изделия используется винтовка Иж-60 с калибром 4,5 мм и начальной паспортной скоростью 150 м/с. А в качестве метаемых объектов – стальные шарики с медным покрытием (0,36 г), дротики с хвостовым оперением (0,63 г, 28 мм длиной) и «магнумы» (0,49 г, заостренные полые цилиндры 6 мм длиной). Макет исследуемой оптической мишени на трех разных лазерных экранах представлен на рис. 2.

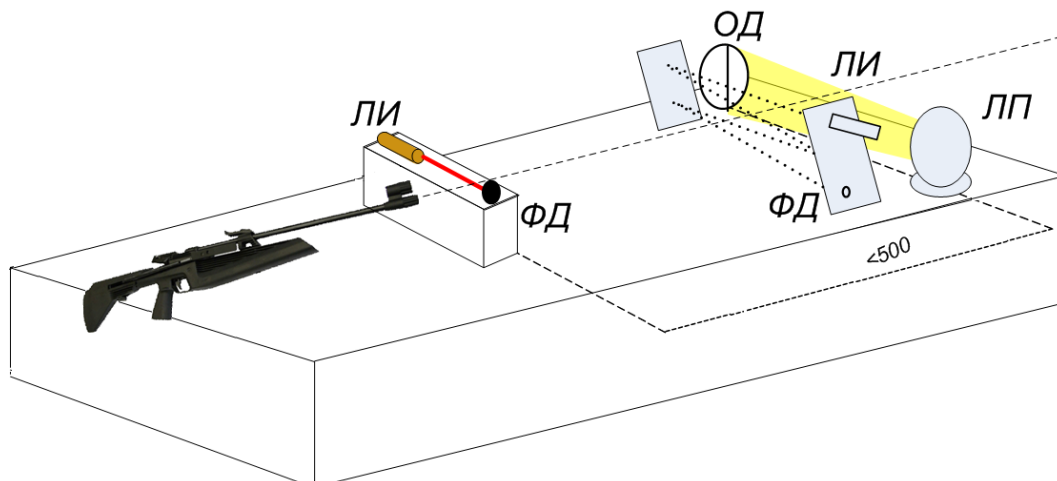


Рис. 2. Макет мишени на лазерных излучателях

В качестве ЛИ и ЛП используются бытовые лазерные указки и лазерные уровни соответственно. В качестве анализатора сигнала цифровой осциллограф (ЦО), например, АСК-3116 (с частотой до 100 МГц) или АСК-2203 (с частотой до 200 МГц), подключаемый к ПЭВМ.

Сравниваются характеристики ряда фотодиодов: специализированного ФД-24К и доступных ФД-10К, ФД-265, ФД-3А (табл. 1). Раз-

мер чувствительного элемента и величина темнового тока вносят существенный вклад в соотношение сигнал/шум ($U_c/\sigma_{ш}$), являющееся основной характеристикой ФД [8–10]. Кроме того, фронт сигнала с ФД не должен быть слишком затянутым – это приводит к потере точности определения момента времени прихода сигнала.

Таблица 1. Параметры фотодиодов

Показатель	Размеры фоточувствительного элемента, мм ²	Диапазон спектральной характеристики $\Delta\lambda$, мкм	Темновой ток I_T , мкА, не более	Рабочее напряжение U_p , В	Температурный диапазон, °С
ФД-24К	95	0,47...1,12	2,5	27	-60 ... +75
ФД-10К	3,6	0,85...0,92	1	20	-60 ... +85
ФД-265	1,3	0,75...0,9	0,1	4	-60 ... +85
ФД-3А	3	0,4...1,9	10	10	-60 ... +75

Первое исследование [11, 12] направлено на выбор ФД и его режима работы: фотогальвани-

ческий или фотопреобразовательный (рис. 3) с оценкой соотношения сигнал / шум (табл. 2).

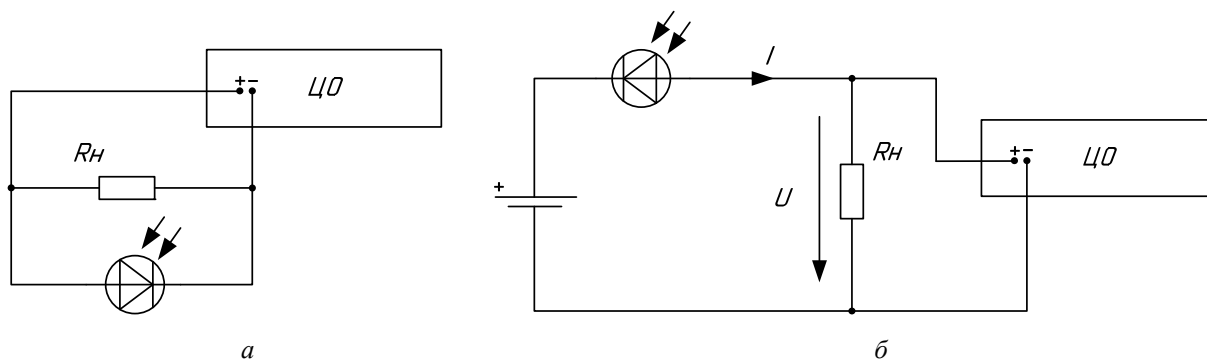
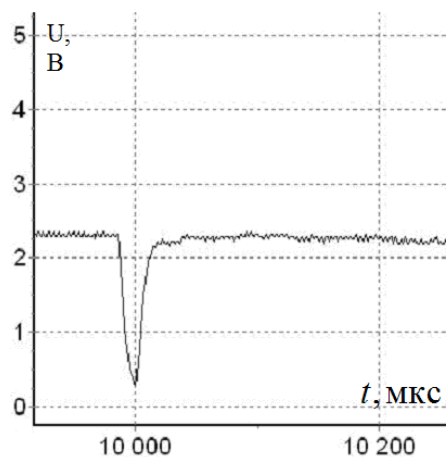


Рис. 3. Режимы подключения фотодиода: а – фотогальванический; б – фотопреобразовательный

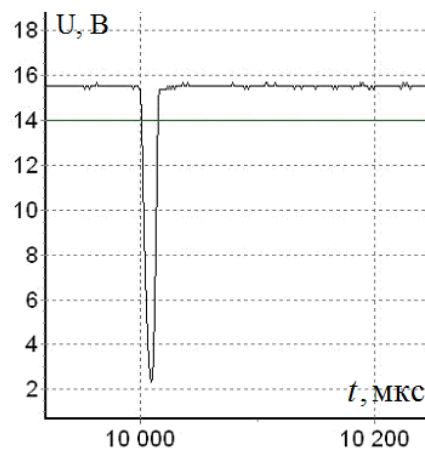
Исследования показали, что использование ФД в фотогальваническом режиме не является оптимальным из-за высокого уровня паразитных шумов и нелинейности характеристик [13], поэтому выбран режим фотопреобразовательный (рис. 3, б), и результаты выбора ФД в этом режиме приведены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2. Параметры импульсов ФД

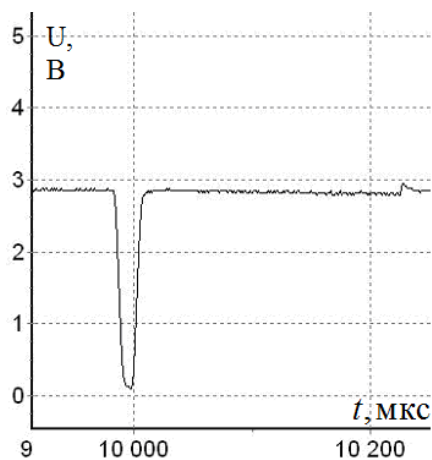
Показатель	ФД-3А	ФД-10К	ФД-24К	ФД-265
$U_c, В$	2,0	13,2	2,85	3,2
$t_{фр}, мкс$	27	20	18	12
$\sigma_{ш}, В$	0,033	0,058	0,022	0,006
$U_c/\sigma_{ш}$	64,5	227,6	129,5	533,3



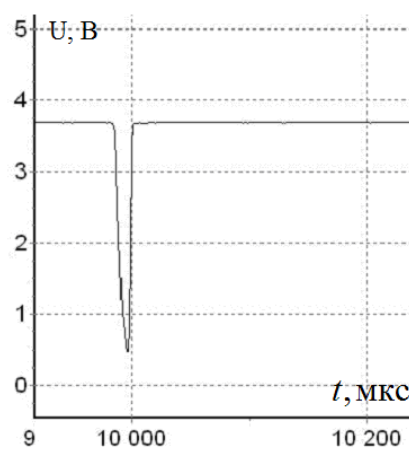
а ФД-3А



б ФД-10К



в ФД-24К



г ФД-265

Рис. 4. Сигналы с ФД в фотопреобразовательном режиме

Сигнал с ФД-10К сильно зашумлен и имеет большую длительность фронта, сигнал с ФД-3А имеет более низкий уровень шума, но длительность фронта не достаточно мала (это повышает погрешность определения момента времени прихода сигнала). Фотодиоды ФД-265 и ФД-24К обладают наилучшими характеристиками. Для ДНО и ЛЗР лучше использовать ФД-265, а в ОД ЛП – ФД-24К, так как они обладают опти-

мальным размером чувствительного элемента и одним из самых низких показателей шума.

Дальнейшие исследования направлены на разработку второго лазерного экрана, но с большей площадью регистрации, чем ДНО [14]. Первая конструкция представляет собой лазерную зеркальную решетку, которая использует две параллельные отражающие поверхности – зеркала, выбранный ранее фотодиод ФД-265 и лазерный излучатель (рис. 5).

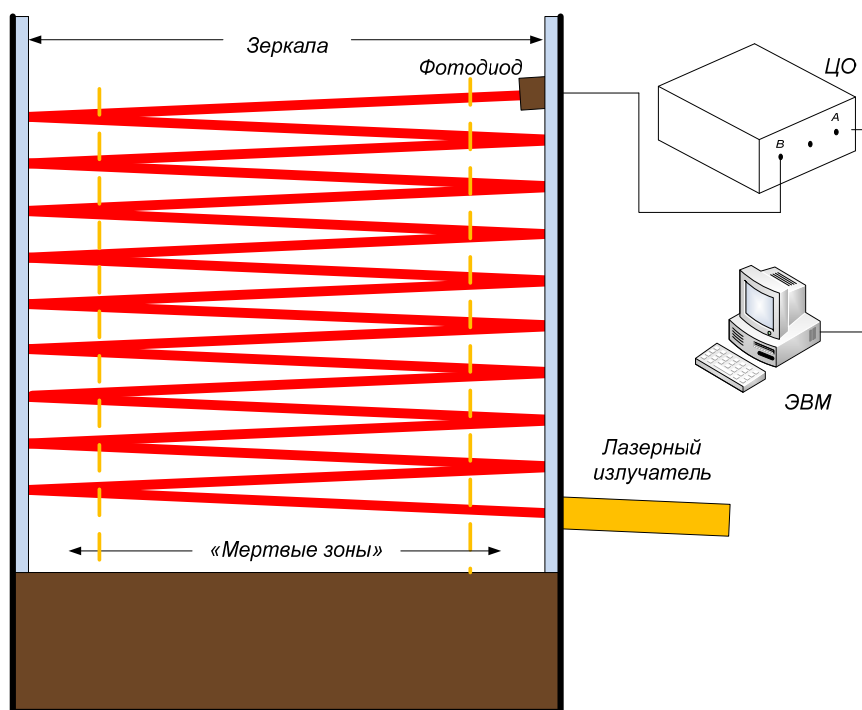


Рис. 5. Конструкция лазерной зеркальной решетки

В ЛЗР оптическая плоскость формируется многократным отражением луча лазерного излучателя таким образом, чтобы шаг лучевой сетки был меньше минимального диаметра пули (в нашем случае 4,2 мм) и луч, многократно отразившись от системы зеркал или зеркальных призм, попадал на фотоприемник. Пуля, проходя через оптическую плоскость в любой ее части, полностью прерывает световой поток, приходящий на фотоприемник, чем приводит в действие электронную схему фиксации времени.

Основная проблема ЛЗР – существенное ослабление лазерного луча при многократном отражении и трудоемкость ручного позиционирования луча ЛЛ для попадания в ФД, поэтому конструкция выбрана максимально компактная с рабочим полем не более 70×70 мм. Кроме этого, вблизи зеркал могут образовываться «мертвые зоны», где невозможно гарантировать надежное перекрытие пуль лазерного луча и, со-

ответственно, надежную фиксацию момента времени пересечения экрана пуль (рис. 5).

Вторая исследуемая конструкция блокирующего устройства – это лазерная плоскость. Она получается с помощью комбинации лазерного уровня (ЛУ, например, LDSL-01 или PA6-GF30) и ОД. Оптический датчик состоит из щелевой диафрагмы (ДЩ), собирающей линзы – конденсора (К) и ранее выбранного ФД-24К (рис. 6). ЛУ имеет излучающую лазерную прямую (у LDSL-01 45 мм, у PA6-GF30 6 мм), свет от нее расходится под углами примерно 20–30 градусов в трапециевидную лазерную плоскость, но на датчик попадает только часть ее, не шире собирающей линзы ОД, что ограничивает рабочее поле светового экрана по высоте (90 × 40 × 45 мм для LDSL-01 и 70 × 40 × 30 мм для PA6-GF30). В случае ЛП пуля прерывает лишь очень малую часть светового потока ЛУ, падающего на ОД (не более 5–10 %), поэтому необходима электронная схема усилителя сигнала (например, на базе ОУ).

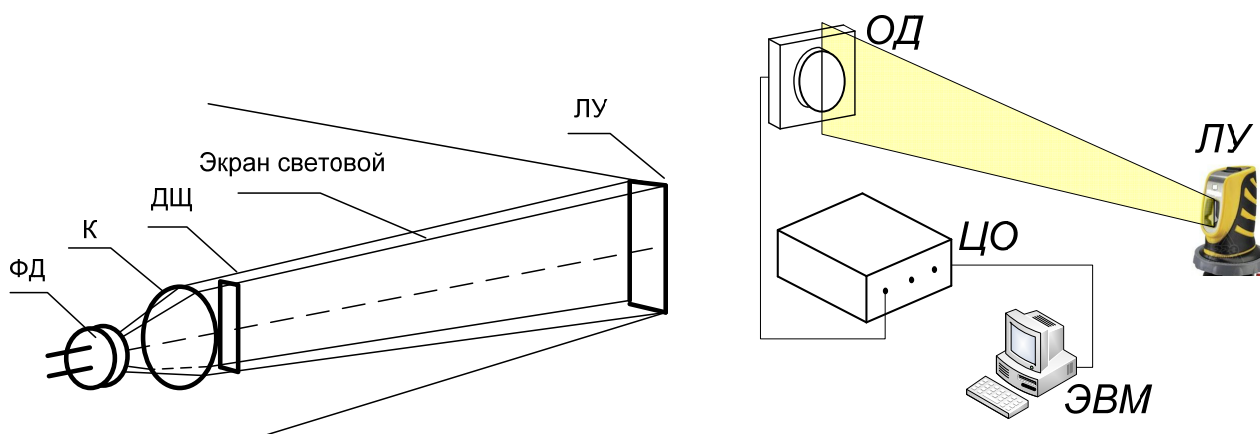


Рис. 6. Конструкция лазерной плоскости

Во время испытаний ЛЗР и ЛП использовались различные типы пуль для пневматического оружия – шарик, «магнум», дротик. Типичные

значения сигналов на осциллографе, полученные во время испытаний, представлены на рис. 7–8.

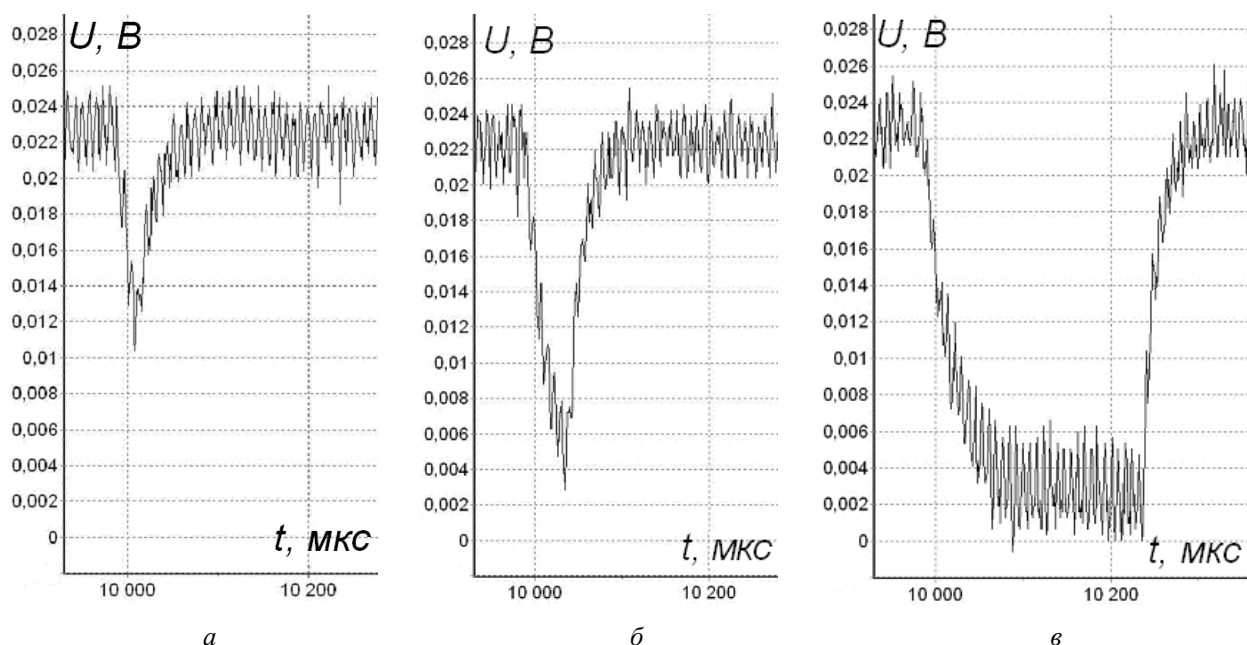


Рис. 7. Сигналы с фотодиода лазерной зеркальной решетки: а – шарик; б – «магнум»; в – дротик

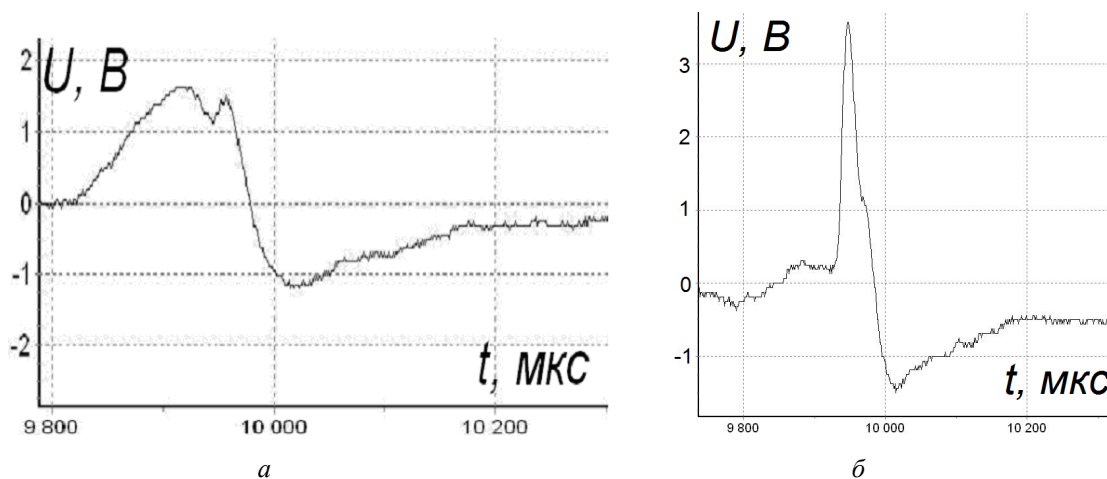
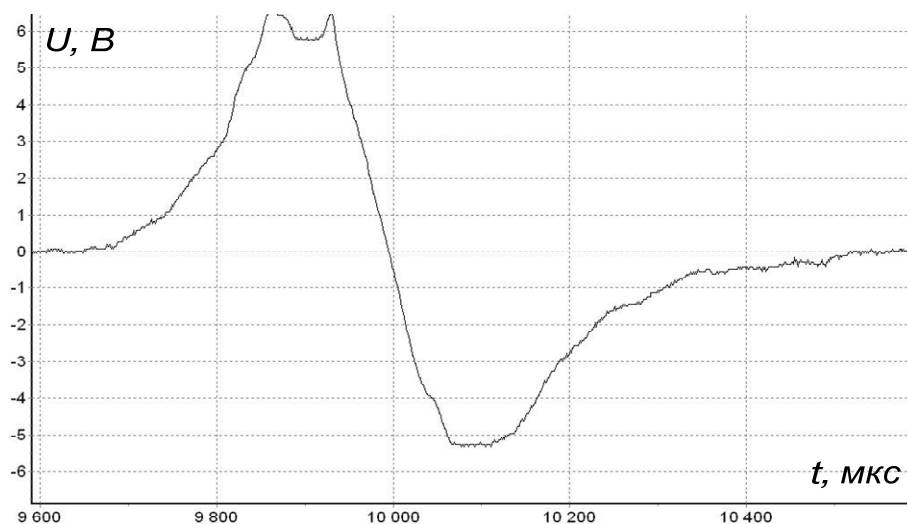


Рис. 8. Сигналы с оптического датчика лазерной плоскости: а – шарик; б – «магнум» (начало)



6

Рис. 8. Окончание: в – дротик

Амплитуда полученных сигналов и СКО шума удовлетворяют необходимым требованиям. Характеристики сигналов представлены в табл. 3–4.

Таблица 3. Параметры импульсов ЛЗР

Параметр	U , В	$t_{фр}$, мкс	$\sigma_{ш}$, В	$U/\sigma_{ш}$
Шарик	0,011	25	0,0042	2,62
«Магнум»	0,018	45	0,0041	4,39
Дротик	0,020	80	0,0044	4,55

Таблица 4. Параметры импульсов ЛП

Параметр	U , В	$t_{фр}$, мкс	$\sigma_{ш}$, В	$U/\sigma_{ш}$
Шарик	1,65	95	0,073	22,6
«Магнум»	3,53	37	0,068	51,9
Дротик	6,41	185	0,071	90,3

Сигналы, полученные с использованием ЛП, заметно лучше, чем полученные от ЛЗР. Во всех случаях соотношение полезный сигнал / шум больше у системы с использованием лазерной плоскости, и влияние на их качество количества света, попадающего на фотодиод, значительно меньше, что связано с более сложной электронной схемой ЛП.

Таким образом, использование лазерных экранов в информационно-измерительных системах «электронная оптическая мишень» для определения скоростных параметров пули является оптимальным выбором, особенно для пневматического оружия. Некоторые недостатки лазерной зеркальной решетки, такие как чувствительность к паразитной засветке и вибрациям от выстрелов, возможное наличие «мертвых зон», а также трудоемкость настройки, можно устранить механическими средствами, при этом

достоинством является большая площадь регистрации экрана. Лазерная плоскость проще в настройке, благодаря наличию щелевых диафрагм малочувствительна к паразитной засветке, но из-за наличия собирающей линзы имеет ограниченные ею размеры зоны регистрации экрана и более сложную электронную часть из-за низкого уровня полезного сигнала. Вследствие небольшого размера зоны регистрации лазерного экрана рекомендуется использовать ЛЗР и ЛП только в начале баллистической траектории (ближе к ДНО, как на рис. 2).

Библиографические ссылки

1. Вдовин А. Ю. Разработка системы на основе световых экранов для определения внешнебаллистических параметров: дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2010.
2. Егоров С. Ф., Коробейников В. В., Казаков В. С. Информационно-измерительные системы оборонного назначения: стрелковые тренажеры и электронные мишени // Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов : материалы научных исследований. Ижевск, 2015. С. 328–349.
3. Вдовин А. Ю., Егоров С. Ф., Марков Е. М. Информационные измерительные системы для определения скорости пули на нескольких дистанциях // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. тр. науч.-техн. конф. ; науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2011. С. 145–148.
4. Вдовин А. Ю., Марков Е. М. Оптимизация положения световых экранов в системах определения скорости и баллистического коэффициента с использованием лазерного излучателя // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2014. № 3 (63). С. 129–132.
5. Вдовин А. Ю., Сапожников К. Ю. Разработка системы определения скорости пули пневматическо-

го оружия // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. трудов регион. науч.-техн. очно-заоч. конф. ; науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2014. С. 346–351.

6. Вдовин А. Ю., Марков Е. М., Корнилов И. Г. Современная автоматизированная система для оценки скорости перемещения затвора стрелкового оружия // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15. № 3. С. 82–87.

7. Вдовин А. Ю., Марков Е. М., Максимова А. В., Покушев А. Н. Создание на основе звуковой платы имитатора сигналов оптических датчиков автоматизированной системы для определения внешнебаллистических параметров // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 3 (30). С. 52–56.

8. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. Л., Польщиков Г. В. Источники и приемники излучения : учеб. пособие для студентов оптических специальностей вузов. СПб. : Политехника, 1991. 240 с.

9. Аксененко М. Д., Бараночников М. Л., Смолин О. В. Микроэлектронные фотоприемные устройства. М. : Энергоатомиздат, 1984. 208 с.

10. Бараночников М. Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. М. : ДМК Пресс, 2012. 640 с.

11. Вдовин А. Ю., Сапожников К. Ю. Оценка возможности применения лазерного излучателя в оптико-электронных системах измерения скоростных параметров метаемых элементов // Вестник КИГИТ. 2012. № 1 (19). С. 34–38.

12. Вдовин А. Ю., Сапожников К. Ю. Выбор фотодиода для системы определения внешнебаллистических параметров с использованием лазерного излучателя // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. трудов регион. науч.-техн. очно-заоч. конф. (18 мая 2013 г.) / науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2013. С. 143–146.

13. Вдовин А. Ю., Корепанов М. А., Егоров С. Ф. Выбор фотодиода в фотодиодном режиме работы для системы измерения скорости пули с использованием лазерного излучателя // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. трудов регион. науч.-техн. очно-заоч. конф. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2015. С. 180–183.

14. Вдовин А. Ю., Шадрин В. В., Корепанов М. А. Анализ возможностей увеличения зоны регистрации при использовании лазерных излучателей в системах определения внешнебаллистических параметров // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. трудов регион. науч.-техн. очно-заоч. конф. ; науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2016. С. 119–124.

References

1. Vdovin A. Yu. (2010). *Razrabotka sistemy na osnove svetovykh ekranov dlya opredeleniya vneshneballisticheskikh parametrov* [Development of a system based on light screens for the determination of external ballistic parameters] (PhD Thesis), Izhevsk (in Russ.).

2. Egorov S. F., Korobeinikov V. V., Kazakov V. S. (2015). *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy oboronnoy naznacheniya: strelkovyye trenazhery i elektronnyye mishi* [Information-measuring systems of the defensive purpose: shooting simulators and electronic targets]. Proceedings of the *Mekhanika i fiziko-khimiya geterogennykh sred, nanosistem i novykh materialov*, Izhevsk, pp. 328-349 (in Russ.).

3. Vdovin A. Yu., Egorov S. F., Markov E. M. (2011). *Informatsionnye izmeritel'nye sistemy dlya opredeleniya skorosti pul' na neskol'kikh distantsiyakh* [Information measuring systems for determining the velocity of bullets at several distances]. Proceedings of the *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii*, Izhevsk, pp. 145-148 (in Russ.).

4. Vdovin A. Yu., Markov E.M. (2014). *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], vol. 3 (63), pp. 129-132 (in Russ.).

5. Vdovin A. Yu., Sapozhnikov K. Yu. (2014). *Razrabotka sistemy opredeleniya skorosti puli pnevmaticheskogo oruzhiya* [Development of a system for determining the velocity of a pneumatic weapon bullet]. Proceedings of the *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii*. Izhevsk, pp. 346-351 (in Russ.).

6. Vdovin A. Yu., Markov E. M., Kornilov I. G. (2017). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], vol. 15, no. 3, pp. 82-87 (in Russ.).

7. Vdovin A. Yu., Markov E. M., Maksimova A.V., Pokushev A. N. (2016). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no. 3 (30), pp. 52-56 (in Russ.).

8. Ishanin G. G., Pankov E. D., Andreev A. L., Pol'shchikov G. V. (1991). *Istochniki i priemniki izlucheniya* [Sources and receivers of radiation]. St. Petersburg: *Politekhnik*, 240 p. (in Russ.).

9. Akseenenko M. D., Baranochnikov M. L., Smolin O. V. (1984). *Mikroelektronnyye fopriemnyye ustroystva* [Microelectronic photodetectors]. Moscow: *Energoatomizdat*, 208 p. (in Russ.).

10. Baranochnikov M. L. (2012). *Priemniki i detektory izlucheniya. Spravochnik* [Receivers and radiation detectors. Directory]. Moscow: *DMK Press*, 640 p. (in Russ.).

11. Vdovin A. Yu., Sapozhnikov K. Yu. (2012). *Vestnik KIGIT* [Vestnik KIGIT], no. 1 (19), pp. 34-38 (in Russ.).

12. Vdovin A. Yu., Sapozhnikov K. Yu. (2013). *Vybor fotodiody dlya sistemy opredeleniya vneshneballisticheskikh parametrov s ispol'zovaniem lazernogo izluchatelya* [Selection of a photodiode for a system for determining external ballistic parameters using a laser emitter]. Proceedings of the *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii*, 18 maya 2013 g. Izhevsk: *Izd-vo IzhGTU*, pp. 143-146 (in Russ.).

13. Vdovin A. Yu., Korepanov M. A., Egorov S. F. (2015). *Vybor fotodiody v fotodiodnom rezhime raboty dlya sistemy izmereniya skorosti puli s ispol'zovaniem*

lazernogo izluchatelya [Selecting a photodiode in the photodiode operation mode for a bullet velocity measuring system using a laser emitter]. Proceedings of the *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii*. Izhevsk: *Izd-vo IzhGTU*, pp. 180-183 (in Russ.).

14. Vdovin A. Yu., Shadrin V. V., Korepanov M. A. (2016). *Analiz vozmozhnostei uvelicheniya zony regist-*

ratsii pri ispol'zovanii lazernykh izluchatelei v sistemakh opredeleniya vneshneballisticheskikh parametrov [Analysis of the possibilities of increasing the registration area when using laser emitters in systems for determining the external ballistic parameters]. Proceedings of the *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii*. Izhevsk: *Izd-vo IzhGTU*, pp. 119-124 (in Russ.).

S. F. Egorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Institute of Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

A. Yu. Vdovin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

E. M. Markov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

T. E. Shelkownikova, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

Research of Laser Screens of Electronic Optical Targets

The paper presents the results of researches on development of laser screens of electronic optical targets for small arms at Computer facilities department of Kalashnikov ISTU and at Institute of Mechanics, Ural Branch of the RAS. The electronic optical targets featured by high precision and noiseproof properties, but at the same time bulkiness of a design, high energy consumption and labor input of control are widely used for test and diagnostics of small and artillery arms on productions and military acceptance and improvement of their operational properties are the relevant task. Options of a design of laser screens with use of mirror lattices and laser planes are investigated. At first the choice of photo diodes for optical sensors and the modes of their work proceeding from a ratio signal/noise and duration of the front of a signal is carried out. Further parameters of a laser mirror lattice are investigated; such shortcomings as essential weakening of a laser beam at repeated reflection, labor input of mechanical control of a lattice and existence of "dead zones" in the near mirror areas are revealed. But restriction of the sizes of the check-in area allows to use nevertheless laser mirror lattices for special cases of tests. The laser plane on the basis of the laser level is also investigated. Proceeding from the small level of a useful signal it is necessary to use slot-hole diaphragms, the optical system and the electronic scheme of strengthening. Complication of a design of the laser plane has allowed to receive the best ratio signal/noise, but the optical system and parameters of the laser level also limit the check-in area sizes to smaller values, than at a laser mirror lattice. Results of experimental tests of laser screens are given. The conclusion is drawn on prospects of further researches and improvements of optical targets for the purpose of expansion of their spheres of use and decrease in prime cost.

Keywords: optical target, photo diode, laser plane, laser mirror lattice, system of equations.

Получено: 16.11.17