

УДК 681.518.3

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-1-27-32

Оценка влияния технологического разброса параметров элементов оптического датчика на выбор оптимальных частот среза фильтра в системах на основе световых экранов*

А. Ю. Вдовин, кандидат технических наук, доцент,
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В измерительных системах на основе световых экранов сигналы оптических датчиков существенно искажены. Это усложняет задачу обнаружения полезных импульсов и увеличивает погрешность системы.

В статье исследуется возможность использования одних и тех же частот среза программно реализованного полосового фильтра для всех датчиков измерительной системы на основе световых экранов. Для этого проводится статистическое моделирование на смеси реального шума и эталонного импульса, создаваемого для каждого типа патрона по отдельности. Эталонный импульс – реальный импульс датчика, полученный в момент выстрела и сглаженный при помощи медианного фильтра.

Анализ полученных при моделировании данных показал, что для разных датчиков минимальные погрешности наблюдаются на различных рабочих участках, определяемых частотами среза полосового фильтра. Полученные результаты позволяют утверждать, что технологический разброс параметров конструктивных элементов оптического датчика может оказывать существенное влияние на параметры оптимального рабочего участка необходимого полосового фильтра. Это означает, что по возможности необходимо стремиться к созданию оптических датчиков с максимально близкими характеристиками. Если же добиться этого невозможно, то при высоких требованиях к точности измерительной системы целесообразно осуществлять поиск оптимальных частот среза для каждого датчика системы по отдельности, при этом индивидуально для каждого типа патронов. В других случаях возможно использование единого рабочего участка полосового фильтра для различных датчиков и типов патронов. При этом выбор оптимальных частот среза целесообразно осуществлять, исходя из наихудшего случая (патрона, соответствующего импульсу с самой малой амплитудой).

Ключевые слова: световой экран, оптический датчик, соотношение сигнал/шум, момент времени прихода импульса, полосовой БИХ-фильтр.

Введение

В автоматизированных системах определения внешнебаллистических параметров на основе световых экранов [1–8] по ряду причин (тепловой шум фотодиода, помехи в цепях питания и пр.) сигналы оптических датчиков могут иметь существенные искажения. Ситуация усугубляется тем обстоятельством, что в некоторых вариантах реализации подобных систем, например в АСИС-2Д [9], для уменьшения их стоимости питание излучателей осуществляется непосредственно от сети переменного тока, что обуславливает дополнительное зашумление сигнала низкочастотной синусоидальной помехой. Все это усложняет задачу обнаружения полезных импульсов и увеличивает погрешность системы. Для снижения погрешностей на схеме оптического датчика реализован аналоговый фильтр, кроме того, применяют взвешенные моменты времени [10, 11], но совместное решение задач обнаружения полезных импульсов и снижения погрешностей при оценке времени

прихода импульса возможно лишь с применением цифровых фильтров.

Предыдущие исследования [12] сигналов оптических датчиков системы АСИС-2Д, созданных на основе фотодиодов ФД-24К, позволили установить примерные границы полосы частот, в пределах которой распределена основная часть полезного сигнала. При этом низкочастотная помеха (~50 Гц) и ее гармоники вызывают резкий выброс спектра в области частот до 1 кГц. Были определены оптимальные частоты среза программно реализованного полосового фильтра Баттерворта для наиболее слабого импульса, соответствующего патрону типа 5,6×15,6 мм R (.22 LR), что позволило добиться существенного улучшения точности определения времени прихода сигнала и повышения соотношения сигнал/шум. Кроме того, был осуществлен [13] поиск оптимальных частот среза аналогичного фильтра с точки зрения улучшения точности определения момента прихода сигнала для некоторых распространенных типов патронов. При этом указанные исследования проводились лишь

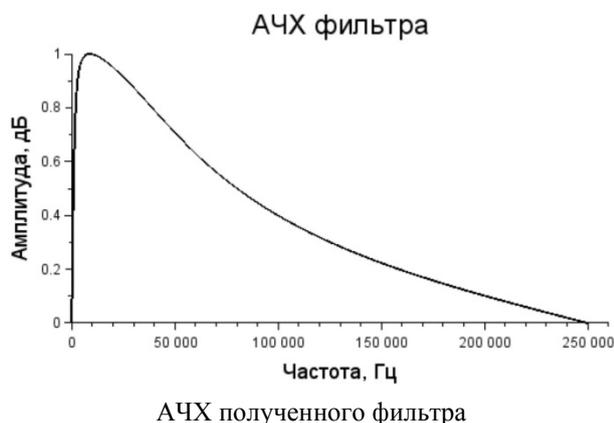
© Вдовин А. Ю., 2021

* Исследование выполнено при финансовой поддержке ИжГТУ имени М. Т. Калашникова в рамках научного проекта № ВАЮ/20-78-23.

на отдельных реальных сигналах, в связи с чем некоторые вопросы остались открытыми. Так, например, не исследовалось влияние технологического разброса параметров отдельных конструктивных элементов (резисторов, конденсаторов, операционного усилителя) оптических датчиков на выбор оптимальных частот среза необходимого цифрового фильтра. Ранее предполагалось, что для всех датчиков системы можно установить одни и те же частоты среза. Результаты проведенных экспериментов [14], с одной стороны, позволили установить достаточно высокую корреляцию массивов напряжений, составляющих полезные импульсы при пересечении пучей световых экранов, соответствующих различным датчикам, но, с другой стороны, в этих же экспериментах было установлено, что технологический разброс параметров конструктивных элементов оптических датчиков может иметь существенное влияние на форму получаемого импульса. Целью настоящего исследования является оценка целесообразности использования одного и того же рабочего участка (нижней F_l и верхней F_u частот среза) цифрового фильтра для всех датчиков системы.

Выбор цифрового фильтра и определение его оптимальных параметров для различных датчиков

Среди наиболее распространенных БИХ-фильтров Баттерворта, Чебышева и эллиптических был выбран фильтр Баттерворта, как имеющий фазовую характеристику, наиболее близкую к линейной [15, 16]. При реализации для уменьшения вычислительной сложности расчетов был взят минимально возможный порядок полосового фильтра – первый. Расчет коэффициентов фильтра будем выполнять в математическом пакете Scilab [17] с использованием функции `iir` (для получения передаточной функции фильтра). Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) созданного фильтра (для частот среза $F_l = 1,5$ кГц и $F_u = 50$ кГц) приведена на рисунке.



В качестве критерия оценки качества фильтрации был выбран критерий минимума среднеквадратического отклонения ошибки измерения заданного параметра сигнала [18–21], в данном случае – момента его прихода. Так как для реальных сигналов истинное время прихода неизвестно, то в Scilab была создана имитационная модель сигнала. Эта модель [22] была получена путем сложения двух составляющих: эталонный шум (реальный шум с датчика, записанный на одном периоде низкочастотного колебания) и эталонный импульс, представляющий собой реальный импульс с датчика, полученный при пересечении пучей светового экрана и сглаженный медианным фильтром с шириной окна 3. Модели создавались по отдельности для каждого из четырех датчиков, входящих в комплект измерительной системы.

Дополнительный критерий качества фильтрации – величина соотношения сигнал/шум, которое можно оценить по формуле [23, 24]:

$$q = \frac{U}{\sigma_N},$$

где σ_N – эффективное (среднеквадратическое) значение шума, U – амплитуда сигнала.

При моделировании в каждом опыте (число опытов $N = 5000$) импульс накладывался на случайный участок шума, после чего определялись два параметра: среднеквадратическое отклонение σ_{ER} разностей между моментами срабатывания, определенными в выбранной точке [25] на исходном эталонном импульсе, и полученной смеси, а также соотношение сигнал/шум q , далее полученные значения усреднялись по серии опытов. Затем осуществлялась фильтрация полученного участка сигнала и аналогичные расчеты повторялись.

Результаты выполненных расчетов до фильтрации для различных типов патронов сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Величина q в созданной модели до фильтрации для разных типов патронов

Тип патрона	№ датчика			
	1	2	3	4
7,62×39	13,3	18,9	13,1	9,7
5,45×39	6,6	13,6	8,4	6,5
5,56×45 мм NATO	5,7	11,8	8,2	7,0

Таблица 2. Величина σ_{ER} (в мкс) в созданной модели до фильтрации для разных типов патронов

Тип патрона	№ датчика			
	1	2	3	4
7,62×39	1,03	1,16	1,2	0,62
5,45×39	1,54	0,83	2,02	1,92
5,56×45 мм NATO	1,12	0,97	1,84	1,41

Нижняя F_l и верхняя F_u частоты среза полосового фильтра варьировались в диапазонах от 1 до 2 кГц и от 40 до 60 кГц соответственно. Результаты расчетов q и σ_{ER} представлены в табл. 3 и 4 (на примере изделия 7,62×39).

Таблица 3. Величина q в созданной модели после фильтрации на примере патрона 7,62×39

№ датчика	F_l , кГц	F_u , кГц		
		40	50	60
1	1	62,1	61,0	60,0
	1,5	66,4	64,9	63,4
	2	67,0	65,2	63,7
2	1	61,0	59,7	58,6
	1,5	61,2	59,8	58,5
	2	60,0	58,5	57,2
3	1	44,1	42,8	41,8
	1,5	43,9	42,5	41,4
	2	42,9	41,4	40,3
4	1	49,7	48,1	46,7
	1,5	52,3	50,2	48,5
	2	52,3	50,0	48,2

Таблица 4. Величина σ_{ER} (в мкс) в созданной модели после фильтрации на примере патрона 7,62×39

№ датчика	F_l , кГц	F_u , кГц		
		40	50	60
1	1	0,14	0,76	0,99
	1,5	0,48	0,99	0,66
	2	0,93	0,69	0,39
2	1	0,83	0,32	0,63
	1,5	0,44	0,58	0,98
	2	0,34	0,93	0,88
3	1	1,01	0,67	0,7
	1,5	0,84	0,63	0,94
	2	0,62	0,87	0,98
4	1	0,27	0,89	0,85
	1,5	0,49	0,97	0,51
	2	0,79	0,73	0,31

Соотношение сигнал/шум в рассматриваемых диапазонах частот среза достаточно стабильно на всех датчиках и изменяется в пределах 5 % (см. табл. 3), поэтому при окончательном выборе рабочего участка (конкретных частот среза фильтра) будем руководствоваться лишь минимальностью СКО ошибки измерения момента времени прихода импульса (в табл. 4

ячейки, соответствующие минимумам, выделены серым). Здесь следует подчеркнуть, что поиск оптимальных частот среза полосового фильтра не является целью настоящего исследования.

Результаты, приведенные в табл. 4, показывают, что для разных датчиков минимумы наблюдаются на различных рабочих участках, более того, на одном и том же рабочем участке может наблюдаться минимальное значение σ_{ER} для одного датчика и наихудшее (для данного набора частот среза) значение для другого (например, полоса частот от 1 до 40 кГц для датчиков 1 и 3). Аналогичные выводы можно сделать и для случаев использования других типов патронов.

Выводы

Полученные результаты позволяют утверждать, что технологический разброс параметров конструктивных элементов оптического датчика может оказывать существенное влияние на параметры оптимального рабочего участка необходимого полосового фильтра. Это означает, что по возможности необходимо стремиться к созданию оптических датчиков с максимально близкими характеристиками.

Если же это невозможно, то при установленных высоких требованиях к точности измерительной системы на основе световых экранов целесообразно осуществлять поиск оптимальных частот среза для каждого датчика системы по отдельности, при этом индивидуально для каждого типа патронов. Если же цель создания системы подразумевает лишь обеспечение стабильного обнаружения сигналов при приемлемом уровне погрешностей, то возможно использование единого рабочего участка для различных датчиков и типов патронов. При этом выбор оптимальных частот среза целесообразно осуществлять, исходя из наихудшего случая (патрона, соответствующего импульсу с самой малой амплитудой).

Библиографические ссылки

1. Афанасьев В. А., Лялин В. Е. Проектирование информационно-измерительных систем на основе световых мишеней для контроля изделий стрелкового оружия по внешнебаллистическим параметрам : монография / Ижевск : Изд-во ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020. 364 с.
2. Афанасьева Н. Ю. Информационно-измерительная система на основе световых экранов для испытаний стрелкового оружия : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2003.
3. Егоров С. Ф., Коробейников В. В., Казаков В. С. Информационно-измерительные системы оборонно-

го назначения: стрелковые тренажеры и электронные мишени // *Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов : материалы научных исследований*. Ижевск, 2015. С. 328–349.

4. Пат. 2213320 Российская Федерация, МПК F 41 J 5/02. Световая мишень / Афанасьева Н. Ю., Веркиенко Ю. В., Казаков В. С., Коробейников В. В.; заявитель и патентообладатель Институт прикладной механики УрО РАН № 2002116940/02 от 24.06.02.

5. Пат. 2279035 Российская Федерация, МПК F 42 В 35/00 G 01 Р 3/68. Устройство для определения внешнебаллистических параметров метательного элемента с помощью световых экранов / Н. Ю. Афанасьева, В. А. Афанасьев, Ю. В. Веркиенко, В. С. Казаков, В. В. Коробейников; заявитель и патентообладатель Институт прикладной механики УрО РАН № 2005100994/02 ; заявл. 18.01.05; опубл. 27.06.06.

6. *Aphanasiev V. A., Vdovin A. U., Kornilov I. G.* Weight functions of light shield and the signal at the input of optical sensor at the intersection of the bullets of light shield. *JOURNAL OF MEASUREMENTS IN ENGINEERING*. JUNE 2019, VOL. 7, ISSUE 2. Pp. 74-83. DOI 10.21595/jme.2019.20441.

7. *Коробейникова И. В., Коробейников В. В., Казаков С. В.* Оптимизация параметров световой мишени // *Вестник ИжГТУ*. 2011. № 2 (50). С. 135–137.

8. *Афанасьев В. А.* Совершенствование моделей и программно-аппаратных средств для контроля изделий по внешнебаллистическим параметрам : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2013.

9. *Вдовин А. Ю.* Разработка системы на основе световых экранов для определения внешнебаллистических параметров : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2010.

10. *Афанасьев В. А., Казаков В. С., Коробейников В. В.* Экспериментальное исследование эффективности использования взвешенных моментов времени в световой мишени // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2010. № 2. С. 99–103.

11. *Афанасьев В. А., Лялин В. Е.* Проектирование информационно-измерительных систем на основе световых мишеней для контроля изделий стрелкового оружия по внешнебаллистическим параметрам : монография / Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020. 364 с.

12. *Вдовин А. Ю.* Цифровая фильтрация в автоматизированных системах определения внешнебаллистических параметров // *Информационные системы в промышленности и образовании : сборник трудов научно-технической конференции факультета «Информатика и вычислительная техника», посвященный 50-летию кафедры «Вычислительная техника» ИжГТУ (25 апреля 2009 г.)*. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2009. С. 52–55.

13. *Вдовин А. Ю., Саляхутдинов К. О.* Использование фильтров Баттерворта для повышения точности автоматизированной системы определения внешнебаллистических параметров на основе световых экранов // *Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. трудов регион.*

науч.-техн. очно-заоч. конф. (г. Ижевск, 23 мая 2015 г.) / науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. С. 184–187.

14. *Красноперова Е. А., Вдовин А. Ю., Егоров С. Ф.* Корреляционный анализ сигналов оптических датчиков системы на основе световых экранов // *Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. трудов Всерос. науч.-техн. конф. (г. Ижевск, 29 мая 2020 г.) / отв. ред. К. Ю. Петухов [Электронный ресурс]*. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020. 12,4 МБ (PDF). С. 266–272.

15. *Айфичер Э., Джервис Б.* Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. / пер. с англ. М. : Вильямс, 2004. 992 с.

16. *Голд Б., Рэйдер Ч.* Цифровая обработка сигналов / пер. с англ., под ред. А. М. Трахтмана. М. : Сов. радио, 1973. 368 с.

17. Решение инженерных задач в среде Scilab / А. Б. Андриевский, Б. Р. Андриевский, А. А. Капитонов, А. Л. Фрадков. СПб. : НИУ ИТМО, 2013. 97 с.

18. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенский и др. ; под ред. Ю. М. Казаринова. М. : Сов. радио, 1975. 296 с.

19. *Якушенков Ю. Г.* Основы теории и расчета оптико-электронных приборов. М. : Сов. радио, 1971. 336 с.

20. *Френкс Л.* Теория сигналов. Нью-Джерси, 1969 / пер. с англ., под ред. Д. Е. Вакмана. М. : Сов. радио, 1974. 344 с.

21. *Трищенко М. А.* Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. М. : Радио и связь, 1992. 400 с.

22. *Романова Е. М., Вдовин А. Ю.* Создание моделей сигналов оптического датчика автоматизированной системы на основе световых экранов // *Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. трудов регион. науч.-техн. очно-заоч. конф. (г. Ижевск, 23 мая 2015 г.) / науч. ред. В. А. Куликов*. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. С. 277–281.

23. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенский и др. ; под ред. Ю. М. Казаринова. М. : Сов. радио, 1975. 296 с.

24. *Лезин Ю. С.* Оптимальные фильтры и накопители сигналов. М. : Сов. радио, 1963. 320 с.

25. *Афанасьев В. А., Казаков В. С., Коробейников В. В.* Экспериментальное исследование влияния порога срабатывания в световой мишени // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2013. Вып. 1 (21). С. 116–119.

References

1. Afanas'ev V.A., Ljaljin V.E. *Proektirovanie informacionno-izmeritel'nyh sistem na osnove svetovoy mishenej dlja kontrolja izdelij strelkovogo oruzhija po vneshneballisticheskim parametram* [Design of informa-

tion and measurement systems based on light targets for the control of small arms products by external ballistic parameters]. Izhevsk, Izd-vo IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2020 (in Russ.).

2. Afanas'eva N.Yu. *Informatsionno-izmeritel'naya sistema na osnove svetovykh ekranov dlya ispytani strelkovogo oruzhiya* [Information-measuring system based on light screens for testing small arms]: PhD thesis. Izhevsk, 2003 (in Russ.).

3. Egorov S.F., Korobeinikov V.V., Kazakov V.S. *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy oboronogo naznacheniya: strelkovye trenazhery i elektronnye misheni* [Defense information-measuring systems: shooting simulators and electronic targets]. *Mekhanika I fiziko-khimiya geterogennykh sred, nanosistem i novykh materialov* [Proc. Mechanics and physical chemistry of heterogeneous media, nanosystems and new materials: materials of scientific research]. Izhevsk, 2015, pp. 328-349 (in Russ.).

4. Afanas'eva N.Yu., Verkiyenko Yu.V., Kazakov V.S., Korobeinikov V.V. *Svetovaya mishen'* [Light target]. Patent RF, no. 2213320, 2002.

5. Afanas'ev V.A., Afanas'eva N.Yu., Verkiyenko Yu.V., Kazakov V.S., Korobeinikov V.V. *Ustrojstvo dlja opredeleniya vneshneballisticheskikh parametrov metatel'nogo jelementa s pomoshh'ju svetovykh jekranov* [Device for determining external ballistic parameters of a throwing element using light screens]. Patent RF, no. 2279035, 2005.

6. Aphanasiev V.A., Vdovin A.U., Kornilov I.G. Weight functions of light shield and the signal at the input of optical sensor at the intersection of the bullets of light shield. *JOURNAL OF MEASUREMENTS IN ENGINEERING*. JUNE 2019, VOL. 7, ISSUE 2. P. 74–83. DOI <https://doi.org/10.21595/jme.2019.20441>.

7. Korobeinikova I.V., Korobeinikov V.V., Kazakov S.V. [Optimization of parameters of a light target]. *Vestnik IzhGTU*, 2011, no. 2, pp. 135-137 (in Russ.).

8. Aphanasiev V.A. *Sovershenstvovanie modelei i programmno-apparatnykh sredstv dlja kontrolya izdelii po vneshneballisticheskim parametram* [Improvement of models and hardware and software for controlling products by external ballistic parameters]: PhD thesis. Izhevsk, 2013 (in Russ.).

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

10. Afanas'ev V.A., Kazakov V. S., Korobeinikov V.V. [Efficiency Experimental Research of Time Weighted Moments in a Light Target]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2010, no. 2(16), pp. 99-103 (in Russ.).

11. Afanas'ev V.A., Ljalin V.E. *Proektirovanie informacionno-izmeritel'nykh sistem na osnove svetovykh misheney dlja kontrolya izdelij strelkovogo oruzhiya po vneshneballisticheskim parametram* [Design of information and measurement systems based on light targets for the control of small arms products by external ballistic parameters]. Izhevsk, Izd-vo IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2020 (in Russ.).

12. Vdovin A.Yu. *Tsifrovaia fil'tratsiia v avtomatizirovannykh sistemakh opredeleniya vneshneballisticheskikh parametrov* [Digital filtering in automated systems for determining external ballistic parameters]. *Informatsionnye sistemy v promyshlennosti i obrazovanii: Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoi konferentsii fakul'teta "Informatika i vychislitel'naya tekhnika", posvyashchennyi 50-letiyu kafedry "Vychislitel'naya tekhnika" IzhGTU* [Proc. Information systems in industry and education: proceedings of the scientific-technical conference of the faculty of Informatics and computer engineering, dedicated to the 50th anniversary of the Department of Computer engineering of IzhSTU]. Izhevsk, 2009, pp. 52-55 (in Russ.).

13. Vdovin A.Yu., Salyakhtudinov K.O. *Is-pol'zovanie fil'trov Batternorta dlya povysheniya tochnosti avtomatizirovannoi sistemy opredeleniya vneshneballisticheskikh parametrov na osnove svetovykh ekranov* [The applying of Butterworth filters to increase the accuracy of the automated external ballistic parameters measuring system based on light screens]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii: sb. trudov region. nauch.-tekhn. ochno-zaoch. konf.* [Proc. Information technologies in science, industry and education: collection of works region. sci. - tech. conf.] Izhevsk, 2015, pp. 184-187 (in Russ.).

14. Krasnoperova E.A., Vdovin A.Yu., Egorov S.F. *Korrelatsionnyi analiz signalov opticheskikh datchikov sistemy na osnove svetovykh ekranov* [Correlation analysis of signals from optical sensors of the system based on light screens]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii: sb. trudov Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. Information technologies in science, industry and education: collection of proceedings of all-Russian scient.-tech. University. conf.] Izhevsk, 2020, pp. 266-272 (in Russ.).

15. Ifeachor E.C., Jervis B.W. *Digital Signal Processing. A Practical Approach*. Second edition. Moscow, 2004, 992 p.

16. Gold B., Rader C.M. *Digital Processing of Signals*. Moscow, 1973, 368 p.

17. Andrievskii A.B., Andrievskii B.R., Kapitonov A.A., Fradkov A.L. *Reshenie inzhenernykh zadach v srede Scilab* [Solving engineering problems in the Scilab environment]. Sankt Peterburg, NIU ITMO, 2013, 97 p. (in Russ.).

18. Ipatov V.P., Kazarinov Yu.M., Kolomenskii Yu.A. Ul'yanitskii Yu.D. *Poisk, obnaruzhenie i izmerenie parametrov signalov v radionavigatsionnykh sistemakh* [Search, detection and measurement of signal parameters in radio navigation systems]. Moscow: Sovetskoe radio publ., 1975, 296 p. (in Russ.).

19. Yakushenkov Yu.G. *Osnovy teorii i rascheta optiko-elektronnykh priborov* [Fundamentals of the theory and calculation of optoelectronic devices]. Moscow: Sovetskoe radio publ., 1971, 336 p. (in Russ.).

20. Franks L. *Signal theory*. New Jersey, 1969, Translated from English, edited by D. E. Wakman, Moscow: Sovetskoe radio publ., 1974, 344 p. (in Russ.).

21. Trishenkov M.A. *Fotopriemnye ustroistva i PZS. Obnaruzhenie slabyykh opticheskikh signalov*

[Photodetector devices and CCD. Detection of weak optical signals]. Moscow: Radio i svyaz' publ., 1992, 400 p. (in Russ.).

22. Romanova E.M., Vdovin A.Yu. *Sozdanie modelei signalov opticheskogo datchika avtomatizirovannoi sistemy na osnove svetovykh ekranov* [Creating a signal models of the optical sensor used in automated system based on light screens]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii: sb. trudov region. nauch.-tekh. ochno-zaoch. konf.* [Proc. Information technologies in science, industry and education: collection of works region. sci. - tech. conf.] Izhevsk, 2015, pp. 277-281 (in Russ.).

23. Ipatov V.P., Kazarinov Yu.M., Kolomenskii Yu.A., Ul'yanitskii Yu.D. *Poisk, obnaruzhenie i iz-*

merenie parametrov signalov v radionavigatsionnykh sistemakh [Search, detection and measurement of signal parameters in radio navigation systems]. Moscow: Sovetskoe radio publ., 1975, 296 p. (in Russ.).

24. Lezin Yu.S. *Optimal'nye fil'try i nakopiteli signalov* [Optimal filters and signal storage]. Moscow: Sovetskoe radio publ., 1963, 320 p. (in Russ.).

25. Afanas'ev V.A., Kazakov V.S., Korobeynikov V.V. *Ekspperimental'noe issledovanie vliyaniya poroga srabatyvaniya v svetovoi misheni* [Pilot study of influence of the operation threshold in the light target]. Izhevsk, Izd-vo IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2013, no. 1. Pp. 116-119 (in Russ.).

Evaluation of the Influence of Technological Variation of Parameters of Optical Sensor Elements on the Choice of Optimal Filter Cutoff Frequencies in Systems Based on Light Screens

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

In measurement systems based on light screens, the signals of optical sensors are significantly distorted. This complicates the task of detecting useful pulses and increases the system error.

The paper examines the possibility of using the same cutoff frequencies of a software-implemented bandpass filter for all sensors of a measuring system based on light screens. To do this, statistical modeling is performed on a mixture of real noise and a reference pulse generated for each type of cartridge separately. Reference pulse is the real pulse of the sensor received at the time of the shot and smoothed using a median filter.

Analysis of the data obtained in the simulation showed that for different sensors, the minimum errors are observed in different operating areas determined by the bandpass filter cutoff frequencies. The results obtained allow us to state that the technological variation of the parameters of the structural elements of the optical sensor can have a significant impact on the parameters of the optimal working section of the necessary bandpass filter. This means that, if possible, it is necessary to strive to create optical sensors with as close characteristics as possible.

If this is not possible, then with high requirements for the accuracy of the measuring system, it is advisable to search for the optimal cutoff frequencies for each sensor of the system separately for each type of cartridge. In other cases, it is possible to use a single working area for different sensors and types of cartridges. In this case, the choice of optimal cutoff frequencies should be carried out based on the worst case (the cartridge corresponding to the pulse with the smallest amplitude).

Keywords: light screen, optical sensor, signal-to-noise ratio, pulse arrival time, band-pass IIR filter.

The work was carried out at the financial support by Kalashnikov Izhevsk State Technical University within the framework of the grant no. VAYu/20-78-23.

Получено: 13.12.2020