



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-117-123
УДК 681.5

Научная статья / Research article

Автоматизированная система оптических измерений жидкокристаллических элементов с улучшенными характеристиками выходного сигнала

В.В. Усачев^a✉, В.В. Беляев^{a,b}, Д.Н. Чаусов^{b,c}, С.В. Мойсеенко^{a,d}

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bМосковский государственный областной университет, Мытищи, Российская Федерация

^cИнститут общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

^dАО «АЛЬФА-БАНК», Москва, Российская Федерация

✉ usachev.burevestnik@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 февраля 2022 г.

Доработана: 13 апреля 2022 г.

Принята к публикации: 30 апреля 2022 г.

Ключевые слова:

автоматизированная система, жидкий кристалл, интегральная оптика, генерация сигналов

Аннотация. Рассматривается разработанная автоматизированная система для исследования ячейки жидкого кристалла, которая состоит из аппаратной и программной частей. В отличие от ранее разработанных устройств оптических измерений жидкокристаллических элементов представленная автоматизированная система обеспечивает точность формирования сигнала в пределах 0,5 % и помехозащищенность SFDR не менее 80 дБ. Аппаратная часть системы включает разработку схемы для формирования сигнала напряжения определенной амплитуды и частоты, формирование сигналов для управления движением шагового двигателя и управления интенсивностью светового потока четырех лазерных светодиодов, разработку и трассировку печатной платы. Программная часть заключается в разработке прикладного исполнительного алгоритма, который осуществляет построение синусоидального сигнала на выходе цифро-аналогового преобразователя микроконтроллера. В качестве микроконтроллера используется STM32F746IGT6 на базе ядра ARM Cortex-M7, имеющий суперскалярную архитектуру с динамическим предсказанием, модуль защиты памяти (MPU), блок вычислений с плавающей запятой FPU, а также контроллер прямого доступа к памяти DMA (direct memory access), который используется для ускоренного обмена данными между памятью и периферией. Интерфейс DMA использовался для быстрого управления цифро-аналоговым преобразователем.

Благодарности

Работа частично выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00466, <https://rscf.ru/project/22-29-00466/>

Для цитирования

Усачев В.В., Беляев В.В., Чаусов Д.Н., Мойсеенко С.В. Автоматизированная система оптических измерений жидкокристаллических элементов с улучшенными характеристиками выходного сигнала // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 117–123. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-117-123>



Automatized system of optical measurements of liquid crystal elements with improved output signal characteristics

Vladimir V. Usachev^a✉, Victor V. Belyaev^{a,b}, Denis N. Chausov^{b,c}, Sergey V. Moyseenko^{a,d}

^aPeoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

^bMoscow Region State University, Mytishi, Russian Federation

^cProkhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^dJSC "ALPHA-BANK," Moscow, Russian Federation

✉ usachev.burevestnik@yandex.ru

Article history

Received: February 17, 2022

Revised: April 13, 2022

Accepted: April 30, 2022

Keywords:

automated systems, liquid crystal, integral optics, signal generation

Abstract. The article discusses the developed automated system for the research of a liquid crystal cell, which consists of hardware and software parts. Unlike previously developed devices for optical measurements of liquid crystal elements, the automated system under consideration provides signal generation accuracy within 0.5% and SFDR noise immunity of at least 80 dB. The hardware part of the system includes the development of a circuit for generating a voltage signal of a certain amplitude and frequency, the formation of signals for controlling the movement of a stepper motor and controlling the intensity of the luminous flux of four laser LEDs, the development and tracing of a printed circuit board. The software part consists in the development of an applied executive algorithm that builds a sinusoidal signal at the output of a digital-to-analog converter of a microcontroller. This example uses the STM32F746IGT6 microcontroller based on the ARM Cortex-M7 core, which has a superscalar architecture with dynamic prediction, a memory protection module, a floating-point computing unit, as well as a direct memory access controller DMA (direct memory access), which is used for accelerated data exchange between memory and peripherals. The DMA is used to quickly control the digital-to-analog converter.

Acknowledgements

The investigation is fulfilled in part by support of Russian Science Foundation, grant No. 22-29-00466, <https://rscf.ru/project/22-29-00466/>

For citation

Usachev VV, Belyaev VV, Chausov DN, Moyseenko SV. Automatized system of optical measurements of liquid crystal elements with improved output signal characteristics. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):117–123. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-117-123>

Введение

Для разработки и эксплуатации современных жидкокристаллических (ЖК) устройств и материалов для видимого, инфракрасного (ИК) и терагерцового диапазона требуется измерение их характеристик с высокой точностью. Особенностью современных устройств является сложная форма и малая длительность электрического сигнала, управляющего оптическими характеристиками ЖК-элемента. Для лабораторных исследований ЖК-материалов и прототипов устройств на их основе требуется постоянная адаптация параметров электрического сигнала к широкому набору физических свойств ЖК (упругая деформация по Франку, диэлектрическая проницаемость, показатели преломления и др.) и эксплуатационных параметров ЖК-ячеек (диапазон

рабочих напряжений, времена переключения, углы обзора и др.).

Поэтому, несмотря на наличие различных измерительных комплексов у производственных компаний и университетов, актуальной остается задача обеспечения процесса измерений надежными, точными, адаптируемыми инструментами и методиками. Примерами таких систем являются разработки компаний Radiant Vision Systems¹, Instrument Systems², Advanced Measurement System³ и многих других.

¹ Radiant Vision Systems. URL: <https://www.radiantvisionsystems.com> (дата обращения: 02.02.2022).

² Instrument Systems. URL: <https://www.instrumentsystems.com/en> (дата обращения: 02.02.2022).

³ Advanced Measurement System. URL: <https://www.admesy.com> (дата обращения: 21.02.2022).

Развитие новых измерительных систем стимулируется и появлением нового поколения датчиков⁴. И наконец, с учетом недоступности в России многих измерительных систем для дисплеев, обусловленной среди прочих причин практическим отсутствием предприятий, производящих матричные ЖК-дисплеи, разработка таких систем является одним из компонентов реализации концепции импортозамещения. При этом следует отметить разработку и стандартизацию в России ряда методик измерения характеристик многих параметров ЖК-материалов и ячеек, особенно параметров, описывающих взаимодействие жидкого кристалла с ориентирующей поверхностью [1]. За рубежом такие стандартные методики отсутствуют.

1. Цель

Современный уровень развития индустрии и технологий поставил задачу разработки общих принципов проектирования автоматизированных систем управления, цель которых – обеспечить создание высокоэффективных систем управления, обладающих такими характеристиками, как высокая точность, быстродействие, устойчивость, низкая чувствительность к внешним воздействиям, адаптивность и управляемость.

Цель данной работы – разработка автоматизированной системы измерений электрооптических жидкокристаллических элементов с улучшенными характеристиками выходного сигнала, такими как точность формирования сигнала, помехозащищенность и низкая чувствительность к искажению входного синусоидального сигнала.

2. Методы и материалы

Основным элементом жидкокристаллических дисплеев (ЖКД) является ЖК-ячейка. Она представляет собой тонкий слой ЖК, помещенный между двумя стеклянными или пластиковыми подложками⁵.

Жидкокристаллическая ячейка используется для подачи на нее сформированного синусоидального сигнала напряжения определенной амплитуды и частоты. Амплитуда сигнала может изменяться в пределах от 5 до 40 вольт постоянного напряжения в положительной полуоси и от –40 до –5 вольт в отрицательной полуоси напряжения. Частота сигнала может изменяться в пределах от 100 кГц до 50 МГц, в зависимости от величины импульса, подаваемого на вход микросхемы, формирующей синусоидальный сигнал.

Структурная блок-схема автоматизированного комплекса для исследования ячейки жидкого кристалла представлена на рис. 1. Она состоит из оптической и информационной систем. Оптическая система включает в себя источник оптического излучения, в качестве которого выступает генератор прямого цифрового синтеза на основе микросхемы AD9843⁶, формирующей заданный оптический синусоидальный сигнал, амплитуду и частоту которого можно изменять в широком диапазоне. Объект контроля представляет собой ячейку жидкого кристалла, которая реагирует на синусоидальный сигнал под действием приложенного напряжения и переориентирует молекулы жидкого кристалла. В качестве средства измерения используется фотодиод с предварительной схемой усиления на основе операционного усилителя.

Информационная система представляет собой программный исполнительный алгоритм, который осуществляет построение синусоидального сигнала на выходе цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) микроконтроллера⁷. Также информационная система реализует запись результатов измерений в отдельном файле, который можно конвертировать в табличный формат Excel и построить график по существующим контрольным точкам.

⁴ MEMS and sensors. URL: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors.html> (дата обращения: 28.02.2022).

⁵ Liquids – sealed cells and sandwiches. URL: <https://www.internationalcrystal.net/liquids-sealed-cells-and-sandwiches> (дата обращения: 21.02.2022).

⁶ AD9834. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/205/DOC000205377.pdf> (дата обращения: 22.02.2022).

⁷ Journal of Communications Technology and Electronics. URL: <https://www.pleiades.online/ru/journal/comtech/> (дата обращения: 23.02.2022).

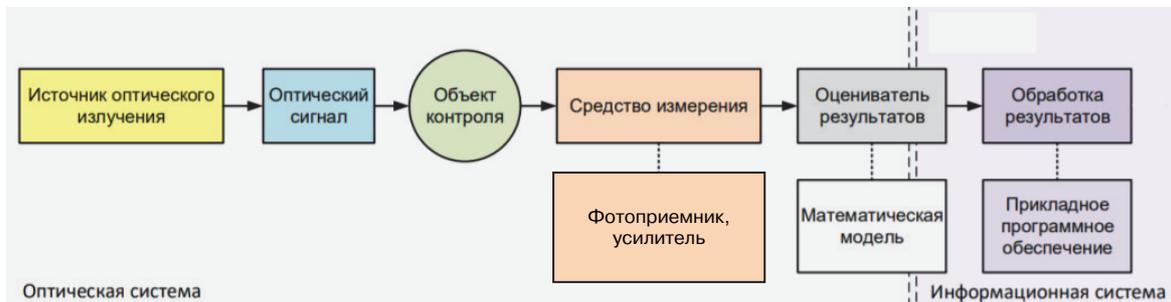


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы оптических измерений

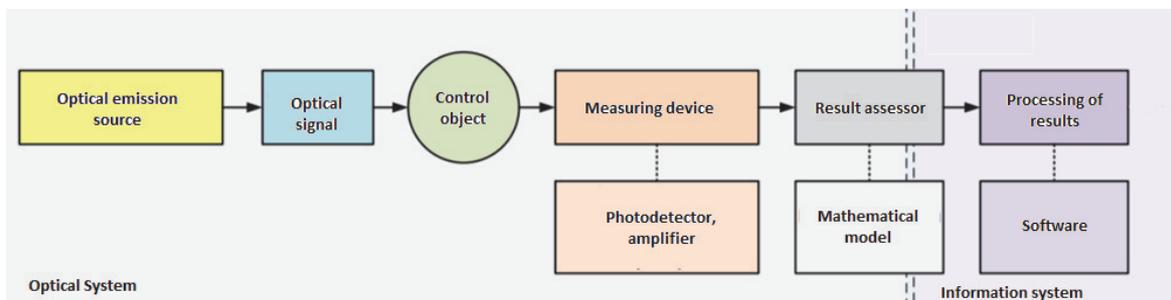


Figure 1. Structural schematic of an automated optical measurement system

3. Результаты и обсуждение

Рассмотрим создание генератора сигналов на основе микросхемы AD9834, с помощью которой можно будет формировать синусоидальный, прямоугольный и треугольный сигналы с частотой до 50 МГц. Как следует из названия, генератор сигналов может формировать различные виды сигналов заданной частоты. При этом способе любой сигнал можно сформировать в цифровом виде, а затем преобразовать его в аналоговый вид с помощью цифро-аналогового преобразователя. Чаще всего в современной электронике этот метод используется для формирования синусоидальных сигналов, но с его помощью можно формировать и прямоугольные, и треугольные сигналы, и вообще сигналы любой формы.

Для формирования синусоидального сигнала напряжения используется схема, изображенная на рис. 2. Слева на этой схеме расположен микроконтроллер, который управляет микросхемой прямого цифрового синтеза AD9834 по интерфейсу SPI (serial peripheral interface) с помощью сигнала синхронизации FSYNC, тактового сигнала SCLK и сигнала данных SDATA. Подробно со спецификацией интерфейса SPI можно ознакомиться в [2]. Питание аналоговой части и цифровой части микросхемы AD9834 осуществляется от напряжения 3,3 В,

сигналы DGND (digital ground) и AGND (analog ground) используются для подключения аналоговой и цифровой земли соответственно. Сигнал MCLK (master clock) используется для подключения внешнего тактового генератора с частотой до 50 МГц и для определения максимальной частоты выходного синусоидального сигнала.

В дополнение к этому на рис. 2 изображена микросхема AD5620, которая также управляется от микроконтроллера с помощью интерфейса SPI посредством инвертированного сигнала синхронизации SYNC, сигнала тактирования SCLK и цифрового сигнала ввода данных DIN (digital input).

Микросхема AD5620 представляет собой 12-разрядный цифро-аналоговый преобразователь с выходом по току. Чем выше разрядность преобразователя, тем он точнее. Микросхема ЦАП формирует синусоидальный токовый сигнал на выходе VOUT, который можно ограничить с помощью резистора Rset. В нашем случае сопротивление резистора составляет 6,8 кОм и с учетом внутреннего опорного напряжения V_{ref} величиной 1,2 В ограничение тока соответствует величине 3 мА⁸.

⁸ EVAL-AD9834.

URL: <https://www.farnell.com/datasheets/1905603.pdf> (дата обращения: 22.02.2022).

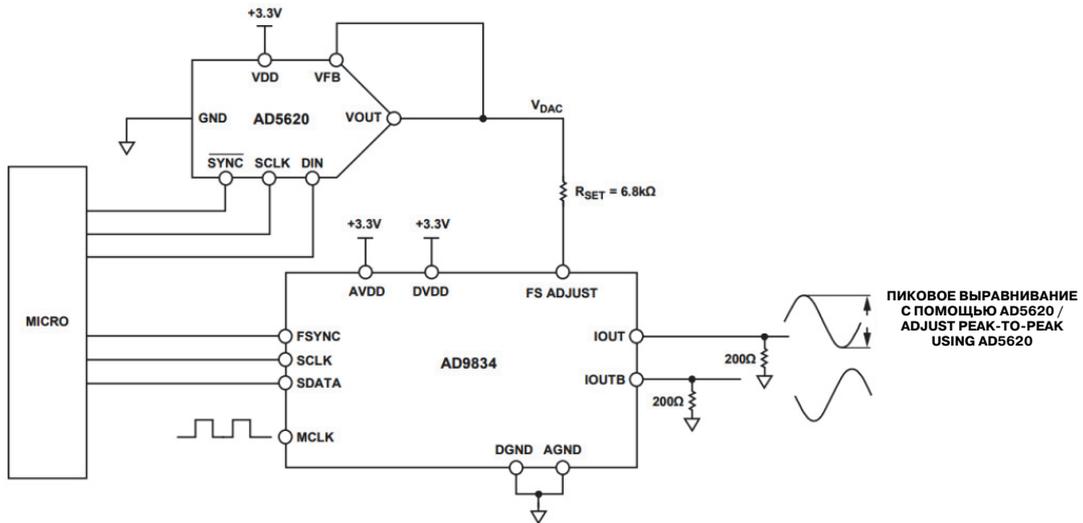


Рис. 2. Электрическая схема формирования синусоидального напряжения, построенная на микросхеме AD9834
Figure 2. Electrical circuit for the formation of a sinusoidal voltage based on the AD9834 chip

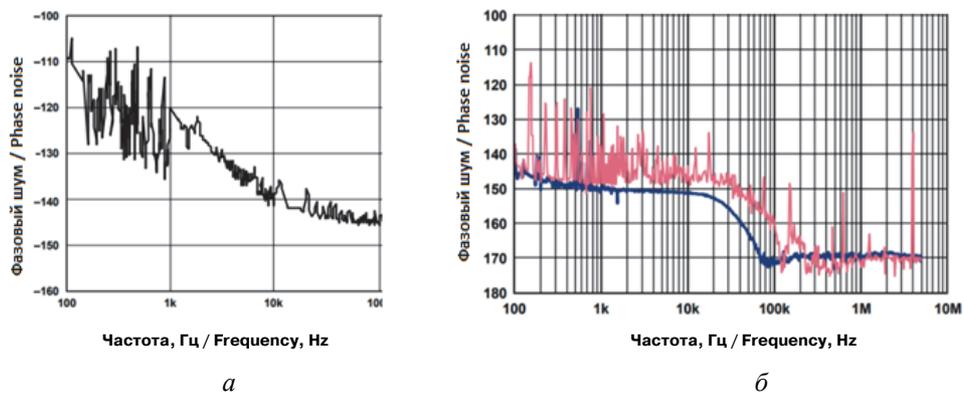


Рис. 3. Диапазон частот фазового шума выходного сигнала:
 а – микросхемы AD9834; б – микросхемы AD9102
Figure 3. The frequency range of the phase noise of the output signal:
 а – AD9834 chips; б – AD9102 chips

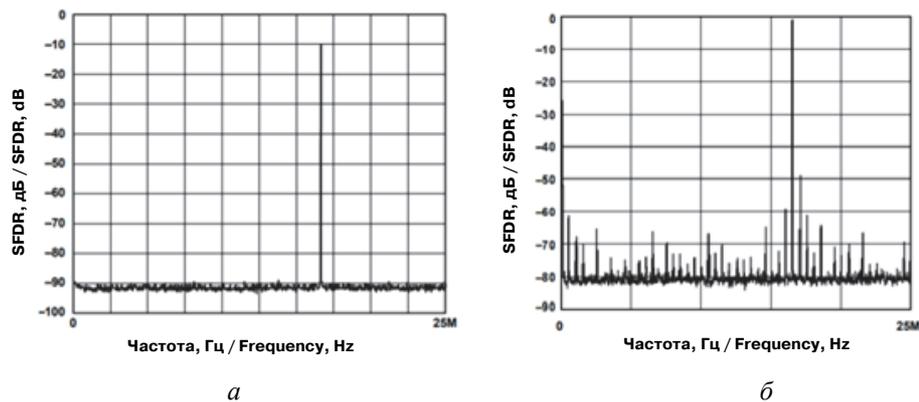


Рис. 4. Спектр выходного сигнала:
 а – микросхемы AD9834; б – микросхемы AD9830
Figure 4. The spectrum of the output signal:
 а – AD9834 chips; б – AD9830 chips

Основными параметрами микросхем прямого цифрового синтеза являются фазовый шум, джиттер – фазовое дрожание цифрового сигнала данных и SFDR – динамический диапазон, свободный от гармоник. Фазовый шум является мерой нестабильности частоты генератора на коротких промежутках времени. Он измеряется в децибелах относительно опорного сигнала при различной величине отклонения от основной частоты генерации. На рис. 3 показан спектр фазового шума, характерный для микросхемы AD9834. В сравнении с другими микросхемами прямого цифрового синтеза, например AD9102⁹, величина фазового шума в полном спектре частот у микросхемы AD9834 на порядок ниже.

Джиттер возникает за счет температурного шума, нестабильности параметров элементов генератора, внешних помех по питанию, по земле и даже через соединение выхода. Кроме того, оказывают влияние внешние магнитные и электрические поля, такие как поля от близко расположенных передатчиков. Таким образом, некоторое дрожание фазы будет присутствовать в выходном сигнале микросхемы прямого цифрового синтеза [3].

SFDR – безразмерная величина, равная отношению мощности полезного узкополосного сигнала к мощности наиболее мощной паразитной частотной составляющей. Характерный спектр выходного сигнала интегральной микросхемы AD9834 при частоте тактирования 50 МГц показан на рис. 4, а. Частота выходного сигнала составляет 1/3 от частоты тактирования – 16,67 МГц. Поэтому в данном случае в полосе 25 МГц практически отсутствуют гармоники, эффекты наложения спектров минимальны и спектр выглядит незашумленным; все максимумы в спектре как минимум на 80 дБ слабее сигнала (SFDR = 80 дБ). На рис. 4, б представлен спектр выходного сигнала микросхема AD9830 при частоте тактирования 50 МГц и выходной частоте 16,5 МГц.

Как видно из графика, в спектре сигнала имеются гораздо больше иголок и, соответственно, паразитных частотных составляющих¹⁰.

Заключение

Для исследования ячейки жидкого кристалла, применяемой в видимом, ИК и терагерцовом диапазонах, разработана автоматизированная система оптических измерений жидкокристаллических элементов. На примере микросхемы AD9834 с помощью метода прямого цифрового синтеза рассмотрено получение синусоидального аналогового сигнала за счет генерации временной последовательности цифровых отсчетов и их дальнейшего преобразования в аналоговую форму с помощью цифро-аналогового преобразователя AD5620. Указанная автоматизированная система обладает сравнительно высокими показателями помехозащищенности и помехоустойчивости выходного сигнала, которые подтверждаются сравнением графиков спектра фазового шума и выходного сигнала микросхем прямого цифрового синтеза, а следовательно, всей системы в целом.

Список литературы

1. Беляев В.В., Чилая Г.С. Жидкие кристаллы в начале XXI века. М.: ИИУ МГОУ, 2015. 136 с.
2. Лапин А.А. Интерфейсы. Выбор и реализация. М.: Техносфера, 2005. 168 с.
3. Бондаренко М.В., Слюсар В.И. Влияние джиттера АЦП на точность пеленгации цифровыми антенными решетками // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2011. Т. 54. № 8. С. 41–49.

References

1. Belyaev VV, Chilaya GS. *Liquid crystals at the beginning of the 21st century*. Moscow: MRSU Publ.; 2015. (In Russ.)
2. Lapin AA. *Interfaces. Selection and implementation*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2005. (In Russ.)
3. Bondarenko MV, Slyusar VI. The influence of ADC jitter on the accuracy of direction finding by digital antenna arrays. *Izvestiya of Higher Educational Institutions. Radio Electronics*. 2011;54(8):41–49. (In Russ.)

⁹ AD9102. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/442/DOC011442569.pdf> (дата обращения: 21.02.2022).

¹⁰ Signal Spectrum. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/signal-spectrum> (дата обращения: 21.02.2022).

Сведения об авторах

Усачев Владимир Владимирович, аспирант, кафедра нанотехнологий и микросистемной техники, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-1616-7062; usahev.burevestnik@yandex.ru

Беляев Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; заведующий кафедрой теоретической физики, Московский государственный областной университет, Российская Федерация, 141014, Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24; ORCID: 0000-0003-0553-9358, eLIBRARY SPIN-код: 5730-0900; belyaev-vv@rudn.ru

Чузов Денис Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий учебно-научной лабораторией теоретической и прикладной нанотехнологии, профессор кафедры теоретической физики, Московский государственный областной университет, Российская Федерация, 141014, Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24; старший научный сотрудник, Институт общей физики имени А.М. Прохорова, Российская академия наук, Российская Федерация, Москва, ул. Вавилова, д. 38; ORCID: 0000-0002-1287-6427, eLIBRARY SPIN-код: 3866-5362; d.chausov@yandex.ru

Мойсеенко Сергей Владимирович, аспирант, кафедра нанотехнологий и микросистемной техники, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ведущий специалист, АО «АЛЬФА-БАНК», Российская Федерация, 107078, Москва, ул. Каланчевская, д. 27; ORCID: 0000-0002-8555-4234; cormorant.xiii@gmail.com

About the authors

Vladimir V. Usachev, PhD student, Department of Nanotechnology and Microsystem Technology, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1616-7062; usachev.burevestnik@yandex.ru

Victor V. Belyaev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Technology, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; Professor of the Theoretical Physics Department, Moscow Region State University, 24 Very Voloshinoy St, Mytishi, 141014, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0553-9358, eLIBRARY SPIN-code: 5730-0900; belyaev-vv@rudn.ru

Denis N. Chausov, D.Sc., Head of Theoretical and Applied Nanotechnology Laboratory, Professor of the Theoretical Physics Department, Moscow Region State University, 24 Very Voloshinoy St, Mytishi, 141014, Russian Federation; senior researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 38 Vavilova St, Moscow, 119991, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1287-6427, eLIBRARY SPIN-code: 3866-5362; d.chausov@yandex.ru

Sergey V. Moiseenko, PhD student, Department of Nanotechnology and Microsystem Technology, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; leading specialist, Joint Stock Company "ALPHA-BANK," 27 Kalanchevskaya St, Moscow, 107078, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8555-4234; cormorant.xiii@gmail.com