



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-81-87>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.375

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЧИТЫВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ КРЕМНИЕВЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ БАЗОВОГО МАТРИЧНОГО КРИСТАЛЛА МН2ХА030\*

ДВОРНИКОВ О.В.<sup>1</sup>, ЧЕХОВСКИЙ В.А.<sup>2</sup>, ГАЛКИН Я.Д.<sup>2,3</sup>, КУНЦ А.В.<sup>2,3</sup>,  
СТЕМПИЦКИЙ В.Р.<sup>3</sup>, ПРОКОПЕНКО Н.Н.<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»  
(г. Минск Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>4</sup>Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)

<sup>5</sup>Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (г. Зеленоград, Россия)

Поступила в редакцию 2 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Целью работы является анализ результатов экспериментального исследования зарядочувствительного усилителя с регулируемым коэффициентом преобразования и схемой восстановления базового уровня, изготовленного на базовом матричном кристалле МН2ХА030 для кремниевых фотоэлектронных умножителей. Усилитель получил название ADPreampl3. Измерение параметров проводилось на партии чипов в количестве 20 штук. В процессе измерения основных параметров усилителя на его вход подавался сигнал с эквивалентной схемы SiPM Photonique. В ходе измерения параметров выявлено, что разброс базового уровня по выходу FOut составил от -24 до 276 мВ при среднем значении 85,6 мВ. При этом изменение напряжения в узле FOutShift от -3 до 3 В достаточно для установления близкого к нулю значения базового уровня по выходу FOut. При отключенной схеме восстановления разброс базового уровня по выходу OutA составил от 300 до 800 мВ. При соединении вывода OutA с шиной нулевого напряжения среднее значение базового уровня по выходу OutA составило 3,72 мВ, а по выходу OutAinv – минус 2,42 мВ. Базовый уровень на выходах OutA и OutAinv плавно изменяется в диапазоне ±0,9 В. При максимальном усилении динамический диапазон ADPreampl3 превышает 20 дБ, однако при этом наблюдается зависимость коэффициента преобразования от величины входного заряда. Для регистрации больших входных зарядов рекомендуется уменьшить величину выходного импульса уменьшением напряжения на выводе Gain либо обрабатывать сигнал с вывода FOut. Проведено сравнение выходных параметров экспериментальных образцов с результатами компьютерного моделирования. Выявлено несоответствие результатов моделирования и измерений, времени пика и задержек распространения сигнала усилителя. Исходя из этого, принято решение о корректировке SPICE-параметров элементов, использованных при моделировании.

\* Статья рекомендована для опубликования организационным комитетом Белорусско-Китайского конкурса научно-технического творчества студентов (г. Минск, 22 ноября – 27 декабря 2019 г.).

**Ключевые слова:** кремниевый фотоэлектронный умножитель, считывающая электроника, базовый матричный кристалл, зарядочувствительный усилитель.

**Для цитирования.** Дворников О.В., Чеховский В.А., Галкин Я.Д., Кунц А.В., Стемпицкий В.Р., Прокопенко Н.Н. Анализ результатов проектирования считывающей электроники кремниевых умножителей на основе базового матричного кристалла MN2XA030. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 81-87.

## ANALYSIS OF THE RESULTS OF DESIGNING READING ELECTRONICS OF SILICON PHOTOMULTIPLIER TUBES DRIVEN BY THE BASE MATRIX CRYSTAL MN2XA030

OLEG V. DVORNIKOV<sup>1</sup>, VLADIMIR A. TCHEKHOVSKI<sup>2</sup>, YAROSLAV D. GALKIN<sup>2,3</sup>,  
ALEXEY V. KUNTS<sup>2,3</sup>, VIKTOR R. STEMPICKI<sup>3</sup>, NIKOLAY N. PROKOPENKO<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>*Minsk Research Instrument-Making Institute JSC (MNIPI JSC) (Minsk, Republic of Belarus)*

<sup>2</sup>*Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)*

<sup>3</sup>*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

<sup>4</sup>*Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)*

<sup>5</sup>*Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Zelenograd, Russia)*

*Submitted 2 March 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** The aim of the work is analyzing the results of an experimental research of a charge-sensitive amplifier with an adjustable conversion coefficient and a base level recovery circuit fabricated on the master slice array MN2XA030 for silicon photomultiplier tubes. The amplifier is called ADPreamp13. The parameters were measured on a small batch of chips in the amount of 20 samples. In the process of measuring the main parameters of the amplifier, the signal from the SiPM Photonique equivalent circuit was fed to the amplifier input. In the course of measuring the parameters, it was revealed that the spread of the baseline level for the FOut output ranged from -24 to 276 mV with an average value of 85.6 mV. In this case, a voltage changing in the FOutShift node from -3 to 3 V is sufficient to establish a base level value of FOut output close to zero. When the recovery scheme is disabled, the spread of the basic level for OutA output is from 300 to 800 mV. When the OutAShift output is connected to the zero-voltage bus the average base level for OutA output is 3.72 mV and for OutAinv output it is minus 2.42 mV. The base level at the outputs OutA and OutAinv smoothly changes in the range of  $\pm 0.9$  V. At maximum gain, the dynamic range of ADPreamp13 exceeds 20 dB, however, at the same time, the conversion coefficient depends on the value of the input charge. To register large input charges, it is recommended to reduce the output pulse by reducing the voltage at the Gain pin or process the signal from the FOut pin. The output parameters of the experimental samples are compared with the results of computer simulation. The discrepancy between the results of modeling and measurements, peak time and propagation delays of the amplifier signal was revealed. Based on this, a decision to adjust the SPICE parameters of the elements used in the simulation was made.

**Keywords:** silicon photomultiplier, reading electronics, master slice array, charge-sensitive amplifier.

**For citation.** Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Galkin Y.D., Kunts A.V., Stempitski V.R., Prokopenko N.N. Analysis of the results of designing reading electronics of silicon photomultiplier tubes driven by the base matrix crystal MN2XA030. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 81-87.

---

\*The manuscript has been recommended for publication by the Organizing Committee of the Belarusian-Chinese Competition of Scientific and Technical Creativity of Students (Minsk, November 22 - December 27, 2019).

## Введение

Кремниевые фотоэлектронные умножители (Si ФЭУ) с успехом применяются в ряде областей науки и техники для регистрации различных видов электромагнитных излучений [1-6], так как по сравнению с электровакуумными ФЭУ обладают меньшими размерами, напряжением питания и шумами [7-9]. Для обработки сигналов Si ФЭУ обычно применяют специализированные аналоговые интегральные схемы (ИС), оптимизированные с учетом параметров источника сигнала – внутренней емкости, амплитуды и длительности токового импульса.

Относительно невысокая потребность в считывающей электронике Si ФЭУ при высокой стоимости ее разработки объясняет актуальность создания специализированных ИС на базовых матричных кристаллах (БМК). Так, авторами на БМК МН2ХА030 был разработан зарядочувствительный усилитель с регулируемым коэффициентом преобразования и схемой восстановления базового уровня (ВБУ), получивший название ADPreampl3 [8].

Целью настоящей статьи является рассмотрение результатов экспериментальных исследований изготовленного на БМК МН2ХА030 усилителя ADPreampl3.

## Методика проведения эксперимента

Подробное описание работы усилителя ADPreampl3 приведено в [8, 11]. При его реализации на БМК были внесены минимальные уточнения, вызванные незначительным изменением сопротивлений резисторов при выполнении межсоединений элементов БМК и формированием диодов на *p-n*- переходах полевого транзистора.

## Результаты и их обсуждение

Экспериментальные образцы БМК МН2ХА030 с аналоговыми блоками были изготовлены в ОАО «ИНТЕГРАЛ» (<http://www.integral.by/>). Измерения выполнялись с помощью комплекта оборудования, включающего генераторы сигналов Agilent 33250 и Tektronix AFG3152C, цифровой осциллограф GDS 73354, двухканальный источник питающих напряжений Agilent 3646A, систему сбора данных 34970A с набором модулей, цифровой мультиметр Agilent 34410A. Сигнал на вход ADPreampl3 поступал от электрической эквивалентной схемы SiPM Photonique с 516 микроячейками [8].

Всего было измерено 20 штук усилителей ADPreampl3. Измерения позволили установить следующее.

1. Разброс базового уровня по выходу FOut составил от –24 до 276 мВ при среднем значении 85,6 мВ. При этом изменения напряжения в узле FOoutShift от –3 до 3 В достаточно для установления близкого к нулю значения базового уровня по выходу FOut.

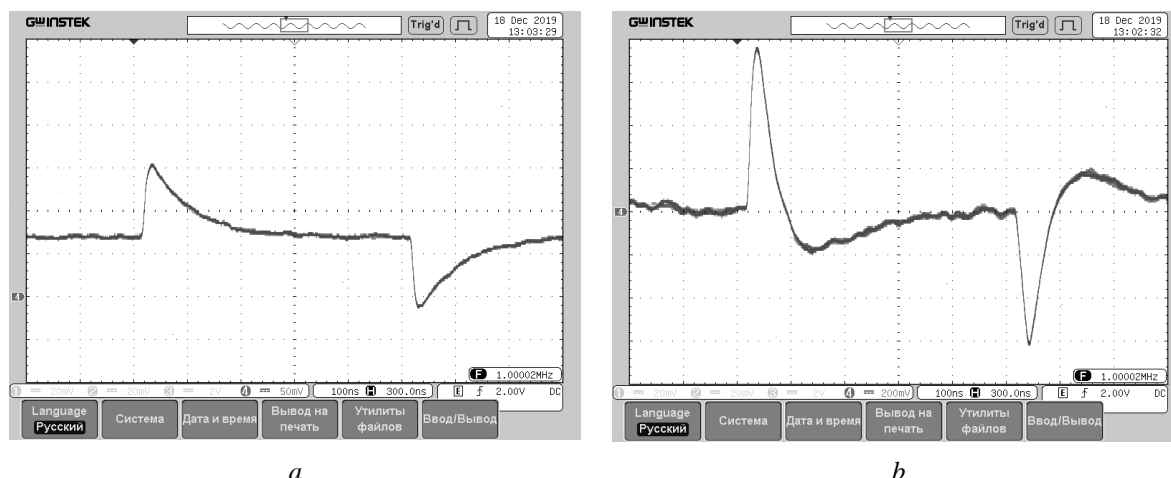
2. При отключенной схеме ВБУ (вывод OutAShift не соединен с каким-либо напряжением) разброс базового уровня по выходу OutA составил от 300 до 800 мВ. При соединении вывода OutAShift с шиной нулевого напряжения среднее значение базового уровня по выходу OutA составило 3,72 мВ, а по выходу OutAinv – минус 2,42 мВ.

3. Схема ВБУ позволяет плавно изменять базовый уровень на выходах OutA, OutAinv в диапазоне  $\pm 0,9$  В.

4. При разработке аналоговых блоков предполагалось, что выходной сигнал усилителя ADPreampl3 будет поступать на вход компаратора с малой входной емкостью. В связи с указанным выходные каскады усилителя представляют собой простые эмиттерные повторители на *n-p-n*-транзисторах и форма импульса по выводам FOut, OutA, OutAinv зависит от входной емкости осциллографа, что приводит к разным выходным импульсам по положительной и отрицательной полувольте. При необходимости, уменьшить влияние емкости нагрузки на форму выходного импульса можно путем применения эмиттерного повторителя на комплементарных биполярных транзисторах, как в ранее разработанных на БМК МН2ХА030 операционных усилителях [12]. Такой выходной каскад увеличивает ток потребления усилителя, и поэтому его применение осуществляется только в обоснованных случаях. Для

исключения влияния емкости осциллографа на форму выходных импульсов при измерениях применялся неинвертирующий повторитель напряжения на микросхеме AD8132, подключенный к выводам FOut, OutA, OutAinv.

Как видно из рис. 1, включение повторителя обеспечивает практически одинаковые формы выходных импульсов обеих полярностей.



**Рис. 1.** Импульсы напряжения для 10-ти включенных микроячеек Si ФЭУ Photonic с повторителем напряжения: *a* – на выходе Fout; *b* – на выходе OutA  
**Fig. 1.** Voltage pulses for 10 active microcells SiPM Photonic with a voltage follower: *a* – Fout output; *b* – OutA output

### Заключение

Экспериментально установлено, что созданная схема восстановления базового уровня уменьшает разброс базового уровня усилителя ADPreampl3 почти в 100 раз и позволяет плавно изменять базовый уровень на выходах OutA, OutAinv в диапазоне  $\pm 0,9$  В.

При максимальном усилении динамический диапазон ADPreampl3 превышает 20 дБ, однако при этом наблюдается зависимость коэффициента преобразования от величины входного заряда. Для регистрации больших входных зарядов рекомендуется уменьшить величину выходного импульса уменьшением напряжения на выводе Gain либо обрабатывать сигнал с вывода FOut.

Измерения выявили несовпадение результатов моделирования и измерений, времени пика и задержек распространения сигнала усилителя, поэтому планируется корректировка межсоединений элементов БМК для увеличения максимального выходного тока и уточнение Spice-параметров транзисторов по результатам измерений экспериментальных образцов.

Разработанный зарядочувствительный усилитель может найти применение при создании на БМК МН2ХА030 многоканальных микросхем обработки сигналов Si ФЭУ.

### Список литературы

1. Paternoster G., Ferrario L., Acerbi F., Gola A.G., Bellutti P. Silicon Photomultipliers Technology at Fondazione Bruno Kessler and 3D Integration Perspectives. *ESSDERC 2019 – 49th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)*. 2019:50-53. DOI: 10.1109/ESSDERC.2019.8901738.
2. Jiang W, Chalich Y, Deen M.J. Sensors for Positron Emission Tomography Applications. *Sensors*. 2019;19(22):5019 DOI:10.3390/s19225019.
3. Goertzen A.L., Zhang X., McClarty M.M., Berg E.J., Liu C., Kozlowski P., Retière F., Ryner L., Sossi V., Stortz G., Thompson C. J. Design And Performance of a Resistor Multiplexing Readout Circuit for a Sipm Detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2013;60(3):1541-1549. DOI: 10.1109/TNS.2013.2251661.
4. Dey S., Myers E., Lewellen T.K., Miyaoka R.S., Rudell J.C. A Row-Column Summing Readout Architecture for Sipm Based Pet Imaging Systems. *2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC)*. 2013:1-5. DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829062

5. Gundacker S., Auffray E., Frisch B., Hillemanns H., Jarron P., Meyer T., Pauwels K., Lecoq P.A. Systematic Study to Optimize Sipm Photodetectors for Highest Time Resolution in Pet. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2012;59(5):1798-1804. DOI: 10.1109/TNS.2012.2202918.
6. Seitz B., Stewart A.G., O'Neill K., Wall L., Jackson C. Performance Evaluation of Novel Sipm for Medical Imaging Applications. *2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC)*. 2013:1-4. DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829685.
7. Sabet H., Prekas G., Breen M., Bhandari H.B., Nickerson P., Derderian G., Robertson F., Kudrolli H., Cool S. High-Performance and Cost-Effective Detector Using Microcolumnar Csi:Tl and SiPM. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2012;59(5):1841-1849. DOI: 10.1109/TNS.2012.2202248.
8. Дворников О.В., Чеховский В.А., Прокопенко Н.Н., Галкин Я.Д., Кунц А.В., Бугакова А.В. Реализация считывающей электроники кремниевых фотоэлектронных умножителей на базовом матричном кристалле МН2ХА030. *Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение*. 2019;78:60-66. DOI: 10.20535/RADAP.2019.78.60-66.
9. Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л. Средства регистрации импульсного видимого излучения малой интенсивности. Часть 1. Особенности и возможности многоканальных фотоприемников с внутренним усилением. *Приборы и методы измерений*. 2012;2(5):5-13.
10. Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л. Средства регистрации импульсного видимого излучения малой интенсивности. Часть 2. Предварительная обработка сигналов кремниевых фотоэлектронных умножителей. Обзор. *Приборы и методы измерений*. 2013;1(6):5-13.
11. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Tchekhovski V.A., Galkin Y.D., Titov A.E., Bugakova A.V. Silicon Photomultipliers' Analog Interface with Wide Dynamic Range. *2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. 2019:1-2. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884430.
12. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. BiJFet Array Chip МН2ХА030 – a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*. 2018:13-17. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415.

## References

1. Paternoster G., Ferrario L., Acerbi F., Gola A.G., Bellutti P. Silicon Photomultipliers Technology at Fondazione Bruno Kessler and 3D Integration Perspectives. *ESSDERC 2019 – 49th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)*. 2019:50-53. DOI: 10.1109/ESSDERC.2019.8901738.
2. Jiang W, Chalich Y, Deen MJ. Sensors for Positron Emission Tomography Applications. *Sensors*. 2019;19(22):5019 DOI:10.3390/s19225019.
3. Goertzen A. L., Zhang X., McClarty M. M., Berg E. J., Liu C., Kozlowski P., Retière F., Ryner L., Sossi V., Stortz G., Thompson C. J. Design And Performance of a Resistor Multiplexing Readout Circuit for a Sipm Detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2013;60(3):1541-1549. DOI: 10.1109/TNS.2013.2251661.
4. Dey S., Myers E., Lewellen T.K., Miyaoka R.S., Rudell J.C. A Row-Column Summing Readout Architecture for Sipm Based Pet Imaging Systems. *2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC)*. 2013:1-5. DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829062.
5. Gundacker S., Auffray E., Frisch B., Hillemanns H., Jarron P., Meyer T., Pauwels K., Lecoq P. A Systematic Study to Optimize Sipm Photodetectors for Highest Time Resolution in Pet. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2012;59(5):1798-1804. DOI: 10.1109/TNS.2012.2202918
6. Seitz B., Stewart A.G., O'Neill K., Wall L., Jackson C. Performance Evaluation of Novel Sipm for Medical Imaging Applications. *2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC)*. 2013:1-4. DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829685.
7. Sabet H., Prekas G., Breen M., Bhandari H.B., Nickerson P., Derderian G., Robertson F., Kudrolli H., Cool S. High-Performance and Cost-Effective Detector Using Microcolumnar Csi:Tl and SiPM. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2012;59(5):1841-1849. DOI: 10.1109/TNS.2012.2202248.
8. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Galkin Y.D., Kunts A.V., Bugakova A.V. [Implementation of Reading Electronics of Silicone Photomultipliers on the Array Chip МН2ХА030]. *Vestnik NTUU «KPI». Seriya Radiotekhnika. Radioapparatostroenie = Visnyk NTUU KPI. Seriya Radiotekhnika. Radioapparatobuduvannia*. 2019;78:60-66. DOI: 10.20535/RADAP.2019.78.60-66. (In Russ.)
9. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L. [Registration Means of low intensity pulsed visible radiation. Part 1. Features and capabilities of multichannel photodetectors with internal amplification]. *Pribory I Metody Izmerenii = Devices and Methods of Measurements*. 2012;2(5):5-13. (In Russ.)
10. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L. [Registration Means of low intensity pulsed visible radiation. Part 2. Pre-processing of signals from silicon photomultiplier tubes. Overview]. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*. 2013;1(6):5-13. (In Russ.)

11. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Tchekhovski V.A., Galkin Y.D., Titov A.E., Bugakova A.V. [Silicon Photomultipliers' Analog Interface with Wide Dynamic Range]. *2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. 2019:1-2. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884430.
12. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziallau V.L., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. BiJFet Array Chip МН2ХА030 – a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*. 2018:13-17. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415.

### Вклад авторов

Дворников О.В. поставил задачу по улучшению уже существующего зарядочувствительного усилителя, разработал топологию микросхемы.

Чеховский В.А. оказал помощь при измерении параметров изделия.

Галкин Я.Д. выполнил моделирование входного каскада устройства, провел основную часть измерений параметров устройства, внес основной вклад в оформление статьи.

Кунц А.В. выполнил моделирование каскада изменения усиления устройства, принял участие в измерении параметров устройства.

Стемпичкий В.Р. является научным руководителем, оказал помощь при моделировании параметров изделия.

Прокопенко Н.Н. выполнил моделирование схемы восстановления базового уровня.

### Authors' contribution

Dvornikov O.V. has set out the problem of improving an existing charge-sensitive amplifier, developed the topology of the chip.

Chekhovskiy V.A. has assisted in measuring device parameters.

Galkin Y.D. has simulated the input stage of the device, carried out the bulk of the measurements of the device parameters and made the main contribution to the design of the article.

Kunts A.V. has simulated a gain changing cascade of device and took part in measuring device parameters.

Stempitskiy V.R. acted as the scientific advisor and assisted in modeling device parameters.

Prokopenko N.N. has simulated the base level recovery circuit.

### Сведения об авторах

Дворников О.В., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт».

Чеховский В.А., исполняющий обязанности заведующего лабораторией «Электронные методы и средства эксперимента» НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Галкин Я.Д., магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, инженер-электроник лаборатории электронных методов и средств эксперимента НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Кунц А.В., магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, инженер-электроник лаборатории электронных методов и средств эксперимента НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

### Information about the authors

Dvornikov O.V., D.Sci., Associate Professor, Chief Researcher of Minsk Research Instrument-Making Institute JSC (MNIPI JSC).

Tchekhovski V.A., acting laboratory manager of "Electronic methods and experiment means" laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Galkin Y.D., master's student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, electronics engineer of Electronic methods and experiment means laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Kunts A.V., master's student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, electronics engineer of Electronic methods and experiment means laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Стемпичский В.Р., к.т.н., доцент кафедры микро- и нанoeлектроники БГУИР, ведущий научный сотрудник НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Прокопенко Н.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники Донского государственного технического университета.

**Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375257250775;  
e-mail: galkinyaroslav@gmail.com  
Галкин Ярослав Денисович

Stempitski V.R., PhD, Associate Professor of Micro- and nanoelectronics Department of BSUIR, Leader Researcher of laboratory 4.4 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Prokopenko N.N., D.Sci., Professor, Head of Information Systems and Radioelectronics Department of Don State Technical University.

**Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375257250775  
e-mail: galkinyaroslav@gmail.com  
Galkin Yaroslav Denisovich