

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ШУМОВЫХ ДИОДОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСТРОЙСТВАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Д.О. Петров<sup>1</sup>, В.В. Буслюк<sup>1,2</sup>, О.О. Латий<sup>1,2</sup>, В.А. Емельянов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «Цветотрон», г. Брест, Республика Беларусь

<sup>3</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», г. Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Проведено исследование температурной стабилизации шумовых диодов для применения в устройствах промышленного интернета вещей (IIoT). Объектами исследования служили кремниевые планарные шумовые диоды производства ОАО «Цветотрон». Предложен метод термокомпенсации на основе последовательного встречного включения двух диодов. Экспериментально подтверждено, что использование данного метода позволяет стабилизировать шумовые параметры (спектральную плотность напряжения шума, граничную частоту) в расширенном диапазоне температур до +125 °С. Полученные результаты обеспечивают возможность применения шумовых диодов в качестве физических источников энтропии для криптографических систем IIoT.

**Ключевые слова:** термокомпенсация; шумовой диод; промышленный интернет вещей; интернет вещей; IIoT; IIoT; криптография; защита данных; физический источник энтропии; генератор случайных чисел.

## INVESTIGATION OF THERMAL COMPENSATION OF NOISE DIODES FOR USE IN INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS DEVICES

D.O. Petrov<sup>1</sup>, V.V. Buslyuk<sup>1,2</sup>, O.O. Latii<sup>1,2</sup>, V.A. Emelyanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Educational Institution “Brest State Technical University”,  
Brest, Republic of Belarus,

<sup>2</sup>Tsvetotron JSC, Brest, Republic of Belarus,

<sup>3</sup>INTEGRAL JSC – managing company of the INTEGRAL holding, Minsk,  
Republic of Belarus

**Abstract.** This study investigates the temperature stabilization of noise diodes for use in Industrial Internet of Things (IIoT) devices. Silicon planar noise diodes were tested in the temperature range up to +125°C. A thermal compensation method using back-to-back series connection of two diodes was proposed and evaluated. The results demonstrate that this approach stabilizes noise parameters, including noise voltage spectral density and cutoff frequency, within acceptable limits at elevated temperatures. The proposed method expands the operating temperature range of noise diodes, enabling their use as physical entropy sources in random number generators for IIoT security applications.

**Keywords:** thermal compensation; noise diode; industrial internet of things; internet of things; IoT; IIoT; cryptography; data protection; physical entropy source; random number generator.

## Введение

Интернет вещей (IoT, Internet of Things) представляет собой систему объединенных компьютерных сетей и подключенных электронных устройств со встроенными датчиками и программным обеспечением (ПО) для сбора и обмена данными, с возможностью удаленного контроля и управления в автоматизированном режиме, без участия человека [1]. В свою очередь под промышленным интернетом вещей (Industrial Internet of Things, IIoT) следует понимать систему объединенных компьютерных сетей и подключенных промышленных электронных устройств со встроенными датчиками и ПО для сбора и обмена данными, с возможностью удаленного контроля и управления в автоматизированном режиме, без участия человека [2]. К электронным устройствам, составляющим промышленный интернет вещей, предъявляются повышенные требования в области кибербезопасности и отказоустойчивости [3, 4]. Одним из способов повышения безопасности процесса обмена данными между устройствами, входящими в состав IIoT, является криптографическая защита передаваемой информации современными симметричными и ассиметричными методами шифрования, криптостойкость которых может быть повышена использованием физических источников энтропии для истинно случайной генерации ключей шифрования [7]. В качестве физических источников энтропии в системах защиты информации достаточно распространено использование шумовых полупроводниковых диодов (ШД), работающих в режиме лавинного пробоя [7]. В условиях воздействия на промышленные электронные устройства изменяющейся в широких пределах температуры особенно важно решение задачи стабилизация вольтамперных (ВАХ) и динамических характеристик полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Тем более, что большинство выпускаемых ШД предназначены для работы при температурах не более +70°C. Установление зависимости параметров шумовых диодов, таких, как напряжение пробоя, спектральная плотность напряжения шума, граничная

частота от температуры, а также разработка метода снижения температурного коэффициента спектральной плотности напряжения шума ШД является актуальной задачей отечественного производства.

### **Экспериментальная установка и методы измерений**

В качестве объектов исследования использованы кремниевые планарные шумовые диоды производства ОАО «Цветотрон» (Республика Беларусь). Эти диоды успешно используются для формирования случайных числовых последовательностей, в метрологических целях для оценки каналов беспроводной связи, а также для маскирования побочных электромагнитных излучений [6,7]. Для обеспечения термостабилизации ШД использовался вариант последовательного включения двух шумовых диодов, включенных навстречу друг другу.

Исследования ШД проводились с применением компьютеризированной лабораторной установки В-300-БрГТУ (УП «Унитехпром БГУ», Республика Беларусь), предназначенной для экспериментального исследования физических процессов в электронных приборах и усилительных устройствах.

Установка имеет в своем составе встроенные электронные цифровые измерительные модули: двухканальный осциллограф, генератор и измеритель напряжений/токов, позволяющие наблюдать формы и измерять параметры электрических сигналов исследуемых электронных схем и компонентов во временном и частотном (спектральном) представлении, а также содержит в своем составе выносной термостатированный модуль для обеспечения нагрева исследуемых электронных приборов.

Методика измерения и расчета шумовых параметров соответствовала техническим условиям (ТУ) на шумовые диоды ТУ ВУ 200007171.038-2008.

Структурная схема регистрации и измерения переменного шумового сигнала ШД представлена на рисунке.

В качестве объектов исследования использованы кремниевые планарные шумовые диоды производства ОАО «Цветотрон» (Республика Беларусь). Эти диоды успешно используются для формирования случайных числовых последовательностей, в метрологических целях для оценки каналов беспроводной связи, а также для маскирования побочных электромагнитных излучений [6,7]. Для обеспечения термостабилизации ШД использовался вариант последовательного включения двух шумовых диодов, включенных навстречу друг другу.

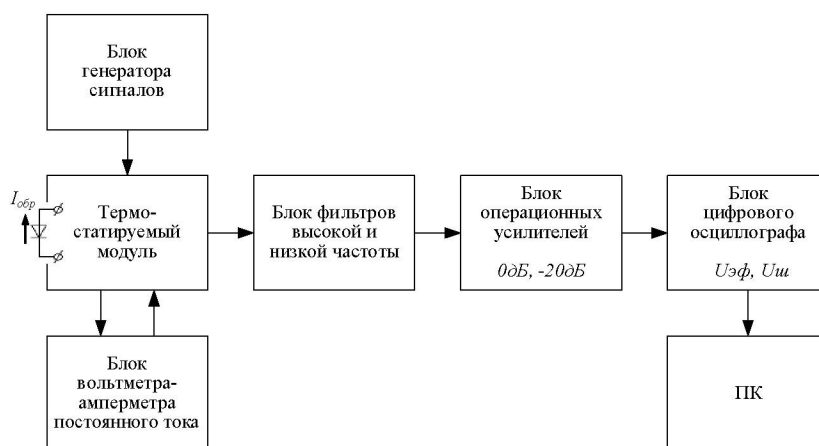
Исследования ШД проводились с применением компьютеризированной лабораторной установки В-300-БрГТУ (УП «Унитехпром БГУ», Республика Беларусь), предназначенной для

экспериментального исследования физических процессов в электронных приборах и усилительных устройствах.

Установка имеет в своем составе встроенные электронные цифровые измерительные модули: двухканальный осциллограф, генератор и измеритель напряжений/токов, позволяющие наблюдать формы и измерять параметры электрических сигналов исследуемых электронных схем и компонентов во временном и частотном (спектральном) представлении, а также содержит в своем составе выносной термостатируемый модуль для обеспечения нагрева исследуемых электронных приборов.

Методика измерения и расчета шумовых параметров соответствовала техническим условиям (ТУ) на шумовые диоды ТУ ВУ 200007171.038-2008.

Структурная схема измерения переменного шумового сигнала ШД представлена на рисунке.



Структурная схема измерения переменного шумового сигнала диода  
Block diagram of the diode AC noise signal measurement

### Результаты измерения и их обсуждение

Ранее, в работе [8] исследованы ВАХ шумовых диодов ND102L, ND103L и ND104L в интервале температур от минус  $25^{\circ}\text{C}$  до  $+35^{\circ}\text{C}$ . Представленные в работе зависимости напряжения пробоя от температуры исследованных шумовых диодов носят линейный характер.

В связи с тем, что верхним пределом эксплуатации большинства кремниевых полупроводниковых приборов является температура  $+125^{\circ}\text{C}$ , была произведена оценка смещения прямой и обратной ветвей ВАХ ШД ND103L при температурах  $+25^{\circ}\text{C}$ ,  $+70^{\circ}\text{C}$  и  $+125^{\circ}\text{C}$ .

Проведены исследования партии из 20 шумовых диодов, работающих в условиях повышенных температур и не содержащих

в конструкции специальных термостабилизирующих элементов. Затем изучены 10 последовательно-парных сборок, сформированных из этих же шумовых диодов, при этом один диод в паре включался в прямом, а другой – в обратном направлении.

В таблице представлены средние значения шумовых параметров последовательной симметричной сборки ШД из этих же приборов при температурах 25°C, 70°C, 125°C. Как следует из таблицы, спектральная плотность напряжения шума, при норме ТУ не менее 30 мкВ / Гц<sup>1/2</sup>, а также граничная частота, при норме не менее 1МГц, не выходит за пределы установленных граничных значений.

Значения шумовых параметров последовательной симметричной сборки ШД ND103 при температуре 25°C, 70°C, 125°C  
Noise parameter values of the series symmetric assembly of ND103 noise diodes at temperatures of 25°C, 70°C, and 125°C

	Наименование и обозначение параметра											
	спектральная плотность напряжения шума (СПНШ)			нелинейность СПНШ			граничная частота шумового сигнала			эффективное напряжение шума		
	$S_U$ , мкВ / Гц <sup>1/2</sup>			$\delta S_U$ , дБ			$f_{гр}$ , МГц			$U_{эф}$ , мВ		
	25°C	70°C	125°C	25°C	70°C	125°C	25°C	70°C	125°C	25°C	70°C	125°C
Среднее значение	121,7	97,2	76,0	1,68	1,66	1,69	3,833	3,077	2,522	238,5	170,2	120,2

### Заключение

Проведенные исследования показали, что повышение температуры приводит к изменению шумовых характеристик ШД. Несмотря на снижение эффективного напряжения шума, граничной частоты и спектральной плотности напряжения шума, температурная стабилизация напряжения пробоя прямосмещенным p-n-переходом ШД ND103L способствует стабилизации шумовых параметров в диапазоне температур до +125°C. Использование предложенного метода термокомпенсации позволит расширить температурный диапазон применения ШД для использования в физических генераторах случайных чисел устройств промышленного интернета вещей.

### Список использованных источников

1. Довгаль В.А., Довгаль Д.В. (2018) Интернет Вещей: концепция, приложения и задачи. *Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки*. 1(212), 37–40.
2. Гринева Н.В., Абдикеев Н.М. (2025) Промышленный интернет вещей как основа интеллектуального производства. *Computational Nanotechnology*. 3(12), 96–104.

3. Alotaibi B. (2023) A Survey on Industrial Internet of Things Security: Requirements, Attacks, AI-Based Solutions, and Edge Computing Opportunities. *Sensors*. 23(17), 7470, 1–49.
4. Alabadi M., Habbal A., Wei X. (2022) Industrial Internet of Things: Requirements, Architecture, Challenges, and Future Research Directions. *IEEE Access*. 10(1), 66374–66400.
5. Hameedi S.S., Bayat O. (2022) Improving IoT Data Security and Integrity Using Lightweight Blockchain Dynamic Table. *Appl. Sci*. 12, 9377, 1–18.
6. Буслюк В.В., Видрицкий А.Э., Голосов Д.А. и др. (2024) *Технологические аспекты производства изделий субмикронной электроники*. Минск, Бестпринт, Гл. 5, 162–200.
7. Петров Д.О., Буслюк В.В., Дереченник С.С., Емельянов В.А. (2023) Шумовые диоды как источник энтропии для аппаратных генераторов случайных чисел. *Безопасность информационных технологий*. 4, 137–149.
8. Zenevich A.O., Kochergina O.V., Buslyuk V.V., Fedosyuk D.N., Lushchy D.A. (2024) On the Temperature Characteristics of Noise Diodes. *Semiconductors*. 13, 1128–1131.

## References

1. Dovgal V.A., Dovgal D.V. (2018) The Internet of Things: concept, applications, and challenges. *Bulletin of Adyge State University. Series 4: Natural-Mathematical and Technical Sciences*. 1(212), 37–40 (in Russian).
2. Grineva N.V., Abdikeev N.M. (2025) Industrial Internet of Things as a foundation for intelligent manufacturing. *Computational Nanotechnology*. 3(12), 96–104 (in Russian).
3. Alotaibi B. (2023) A Survey on Industrial Internet of Things Security: Requirements, Attacks, AI-Based Solutions, and Edge Computing Opportunities. *Sensors*. 23(17), 7470, 1–49.
4. Alabadi M., Habbal A., Wei X. (2022) Industrial Internet of Things: Requirements, Architecture, Challenges, and Future Research Directions. *IEEE Access*. 10(1), 66374–66400.
5. Hameedi S.S., Bayat O. (2022) Improving IoT Data Security and Integrity Using Lightweight Blockchain Dynamic Table. *Appl. Sci*. 12, 9377, 1–18.
6. Buslyuk V.V., Vidritsky A.E., Golosov D.A. et al. (2024) *Technological aspects of manufacturing submicron electronics products*. Minsk, Bestprint, Ch. 5, 162–200 (in Russian).
7. Petrov D.O., Buslyuk V.V., Derechennik S.S., Emelyanov V.A. (2023) Noise diodes as a source of entropy for hardware random number generators. *Information Technology Security*. 4, 137–149 (in Russian).
8. Zenevich A.O., Kochergina O.V., Buslyuk V.V., Fedosyuk D.N., Lushchy D.A. (2024) On the Temperature Characteristics of Noise Diodes. *Semiconductors*. 13, 1128–1131.

## Сведения об авторах

**Петров Д.О.**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры ЭВМ и систем, Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», polegdo@gmail.com.

**Буслюк В.В.**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры ЭВМ и систем Брестского государственного технического университета, ведущий инженер-конструктор ОАО «Цветотрон», vbusliuk58@gmail.com.

**Латий О.О.**, магистр техн. наук, главный конструктор ОАО «Цветотрон», nauka@tsvetotron.com.

**Емельянов В.А.**, д-р техн. наук, проф., главный специалист по науке ОАО «Интеграл», emeljnov@bk.ru.

### **Information about the authors**

**Petrov D.O.**, Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Systems, Educational Institution "Brest State Technical University", Brest, Republic of Belarus, polegdo@gmail.com.

**Buslyuk V.V.**, Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Systems, Brest State Technical University, Lead Design Engineer, Tsvetotron JSC, vbusliuk58@gmail.com.

**Latii O.O.**, Master Sci. (Techn.), Chief Designer, Tsvetotron JSC, nauka@tsvetotron.com.

**Emelyanov V.A.**, Dr. Sci. (Techn.), Professor, Chief Science Specialist, Integral JSC, emeljnov@bk.ru.