



УДК 621.3.083.1

В. Г. Нечаев, А. С. Загородний
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
пр. Ленина, 40, Томск, 634050, Россия
А. И. Добриков
АО «НПФ "Микран"»
пр. Кирова, 51д, Томск, 634041, Россия

Температурная коррекция широкополосных детекторов мощности на основе низкобарьерных диодов

Аннотация. Исследуется температурная зависимость сверхвысокочастотных преобразователей мощности. Приведены аналитические выражения сопротивления перехода и тока насыщения диода, позволяющие оценить степень влияния температуры на выходное напряжение диодных детекторов. Выполнено сравнение двух способов температурной коррекции. Известный способ заключается в достижении температурной стабилизации за счет использования идентичной пары диодов, один из которых компенсирует изменение сопротивления перехода второго диода при изменении температуры. В настоящей статье предложен альтернативный способ, заключающийся в формировании поправочных коэффициентов, позволяющих проводить температурную коррекцию результатов измерений в широком диапазоне мощностей. Представлены результаты экспериментальных исследований детекторов на основе низкобарьерных диодов ZB-28 с граничной частотой свыше 100 ГГц и тангенциальной чувствительностью 1 нВт. На основе температурных испытаний измерителей мощности СВЧ с использованием термодатчика реализован алгоритм термокоррекции, позволивший уменьшить изменение мощности с ± 15 до ± 1.5 %. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенный способ температурной коррекции широкополосных детекторов мощности с использованием показаний термодатчиков может успешно применяться в измерительном СВЧ-оборудовании различного типа.

Ключевые слова: преобразователь мощности, детекторный диод, терморезистор, аппроксимация, температурная коррекция, корректирующая функция, алгоритм коррекции

Для цитирования: Нечаев В. Г., Загородний А. С., Добриков А. И. Температурная коррекция широкополосных детекторов мощности на основе низкобарьерных диодов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 3. С. 79–84.

V. G. Nechaev, A. S. Zagorodny
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, Lenin Pr., 634050, Tomsk, Russia
A. I. Dobrikov
Research and Production Company "Micran"
51d, Kirov Pr., 634041, Tomsk, Russia

Temperature Correction of Broadband Power Detectors Based on Low-Barrier Diodes

Abstract. The article is devoted to investigation of microwave power converter temperature dependence caused by changes in the current-voltage characteristic of diodes. The analytical expressions are given for such diode parameters as junction resistance and diode saturation current that allow to estimate temperature influence on diode detector output voltage. This paper presents a comparison of two methods, i.e. correlation based on a terminological method that works in conjunction with an arithmetic-logical mechanism. The first method implies that the temperature stabilizes by use of identical pair of diodes one of which compensates for temperature-induced changes of the second diode junction resistance. The second method involves formation of correction factors that allow performing temperature correction of measurement results in a wide range of capacities. Based on the conducted temperature tests of microwave power meters with the use of a temperature sensor in the microwave unit, the thermal correction algorithm was implemented. It allows to reduce the changes in the readings from ± 15 to ± 1.5 %. Data from the results of experimental studies that can be used in measuring

microwave equipment of various types. The results of experimental studies of detectors based on low-barrier diodes ZB-28 with a boundary speed exceeding 100 GHz and a tangential sensitivity of 1 nW are presented.

Key words: power converter, detector diode, thermistor, approximation, temperature correction, correction function, correction algorithm

For citation: Nechaev V. G., Zagorodny A. S., Dobrikov A. I. Temperature Correction of Broadband Power Detectors Based on Low-Barrier Diodes. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 3, pp. 79–84. (In Russian)

Влияние температуры на характеристики детектора. Для измерения мощности СВЧ-сигналов широко применяются преобразователи, реализуемые с использованием диодных детекторов. По сравнению с калориметрическими, термисторными и другими методами диодные детекторы обладают рядом преимуществ: способностью обеспечивать большой диапазон рабочих частот, малым временем реакции, высокой чувствительностью [1]. Они активно используются в измерительных приборах различных мировых производителей. Известны устройства детектирования на основе диодов, работающих в диапазоне частот свыше 110 ГГц [2]–[4]. Публикации свидетельствуют о перспективности разработок устройств детектирования диапазона СВЧ и КВЧ на основе низкобарьерных диодов. Однако диодные детекторы имеют существенный недостаток – зависимость выходных показаний от температуры, обусловленную изменениями вольт-амперной характеристики диодов [5].

В настоящей статье представлены исследования детекторных диодов ZB-28 [2] с граничной частотой свыше 100 ГГц (емкость перехода 35 фФ), обладающих тангенциальной чувствительностью 1 нВт (минус 60 дБм). Эквивалентная схема детекторного диода представлена на рис. 1, где R_s – объемное активное сопротивление базы; R_j , C_j – сопротивление и емкость перехода соответственно; L_p , C_p – паразитные индуктивность и емкость соответственно.

Наибольшему влиянию температуры в данной схеме подвержено сопротивление перехода R_j . Его зависимость от температуры описывается формулой [5]

$$R_j = \frac{nkt}{q(I_b + I_s)}, \quad (1)$$

где n – коэффициент идеальности диода; k – постоянная Больцмана; t – температура; q – заряд электрона; I_s – ток насыщения диода; I_b – внешний ток смещения.

Ток насыщения диода I_s характеризует эмиссионную способность катода, которая также зависит от температуры. Указанная зависимость описывается выражением [6], [7]

$$I_s = I_{s0} (t/t_0)^{2/n} e^{(q\psi/k)(1/t-1/t_0)}, \quad (2)$$

где I_{s0} – ток насыщения диода при комнатной температуре; ψ – ширина запрещенной зоны полупроводника; $t_0 = 25^\circ\text{C}$ – комнатная температура [7].

Из (1) и (2) можно получить зависимость сопротивления перехода от изменения температуры. Используя типичные значения SPICE-параметров детекторных диодов ZB-28 $I_{s0} = 11$ мкА, $n = 1.13$, $\psi = 1.42$ эВ [8], [9], получим температурную зависимость сопротивления перехода (рис. 2). Как видно из рисунка, при температурах ниже комнатной изменение сопротивления перехода велико. Влияние этого сопротивления на выходное напряжение детектора, описываемое выражением [5]

$$U_{\text{out}} = U_{\text{rec}} \frac{R_l}{R_l + R_j}$$

(U_{rec} – выпрямленное напряжение; R_l – нагрузочное сопротивление детектора), приводит к су-

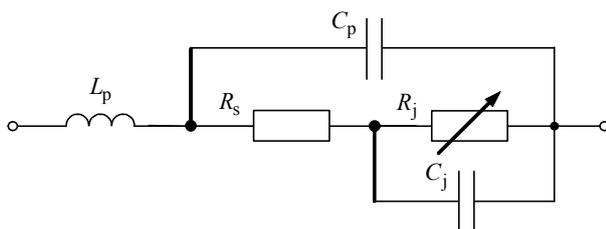


Рис. 1

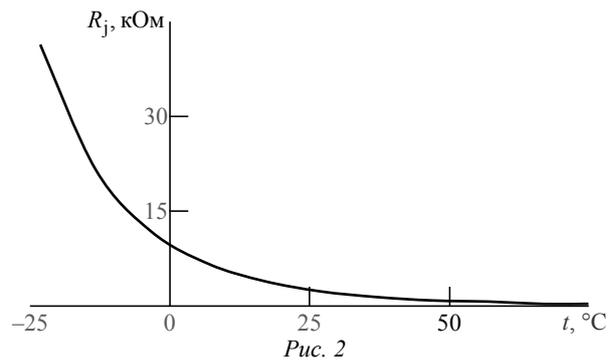
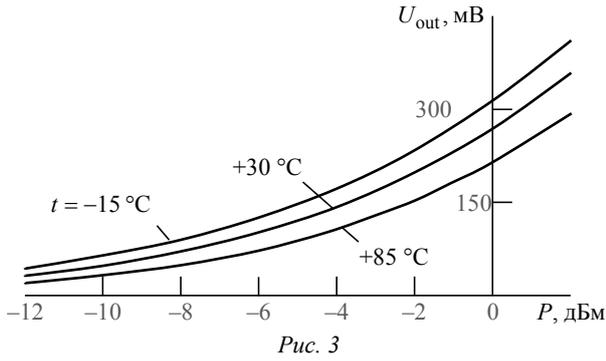


Рис. 2



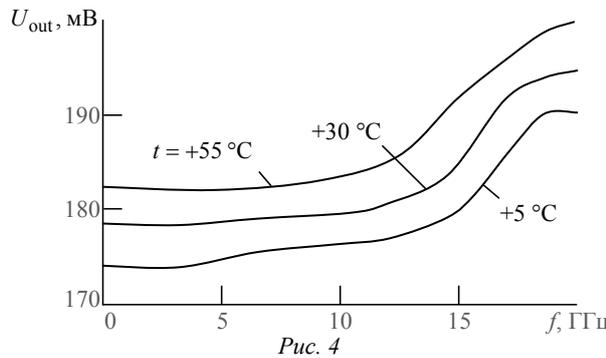
щественному отклонению выходного напряжения детектора от выпрямленного напряжения.

В результате серии экспериментов с использованием детекторов на основе диодов ZB-28 [10], [11] получены зависимости выходного напряжения от мощности входного сигнала при разных температурах (рис. 3). Для более полной характеристики влияния температуры изучены также частотные зависимости¹ выходного напряжения при фиксированной входной мощности в более узком температурном диапазоне (рис. 4). Из рисунка следует, что с изменением температуры характер этой зависимости сохраняется. Следовательно, при коррекции нет необходимости в зависящих от частоты параметрах.

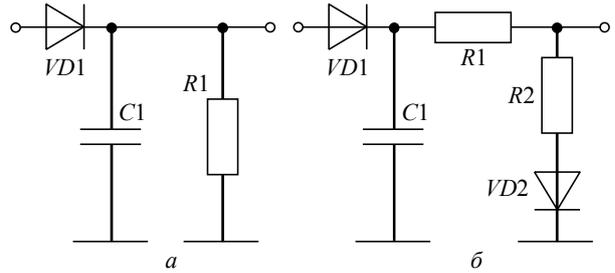
Способы компенсации влияния температуры.

Для уменьшения влияния температуры на диодные детекторы возможно использование термостатирования, включение опорных диодов в цепь детектора, а также учет показаний термодатчиков на основе терморезисторов, работающих совместно с микроконтроллером.

Термостатирование заключается в поглощении или выделении тепла в необходимой области устройства для поддержания некоторой рабочей температуры, тем самым исключая температурный уход показаний [12]. Однако указанный метод требует дополнительных энергозатрат на разогрев де-



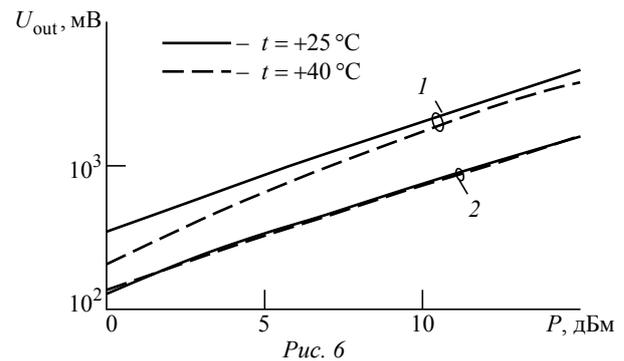
¹ В диапазоне частот 10 МГц...20 ГГц.



текторной камеры, а также увеличения габаритов устройства, что проблематично для портативных преобразователей мощности. Использование термостатирования более целесообразно для стационарных приборов, в которых применяются выносные измерительные сенсоры. В настоящей статье указанный метод не рассматривается.

Для анализа метода включения опорных диодов рассмотрим схему амплитудного детектора (рис. 5, а), содержащую детектирующий диод VD1 и фильтр нижних частот на C1, R1. Компенсация по рассматриваемому методу заключается во включении в схему делителя напряжения R1, R2, в цепь которого включен диод VD2, идентичный VD1 (рис. 5, б). При изменении температуры у обоих диодов аналогичным образом изменяются сопротивления переходов, за счет чего компенсируется изменение выходного напряжения [13].

На рис. 6 изображены экспериментально полученные зависимости выходного напряжения детектора от входной мощности для схем без компенсации (рис. 5, а) (кривые 1) и при использовании параметрической компенсации (рис. 5, б) (кривые 2).



Благодаря применению делителя напряжения с диодом удалось уменьшить изменение напряжения за счет температуры с 17...20 до 2.5...3 %.

Рассмотренный метод достаточно хорошо осуществляет температурную компенсацию при измерениях в узком динамическом диапазоне. Однако при измерениях в широком диапазоне он теряет свою значимость из-за уменьшения выходного напряжения, вызванного делителем (рис. 6).

Температурная коррекция с использованием термодатчика. Использование термодатчика с последующим расчетом поправочных коэффициентов исключает все недостатки, характерные для рассмотренных ранее способов термокоррекции.

В термисторном термодатчике (Thermistor Term Sensor – TTS) в качестве термодатчика используется термистор NCP18XH103 [14], включенный в схему делителя напряжения (рис. 7, а) [15]. Делитель образуют резисторы $R_a = 24$ кОм и $R_b = 240$ кОм.

Термистор имеет сопротивление $R_t = 10$ кОм при температуре $t = 25$ °С и отрицательный температурный коэффициент. На рис. 7, б изображена температурная зависимость выходного напряжения датчика U_{TTS} при входном напряжении $U_{inp} = 5$ В.

Указанный термистор обладает малыми габаритами, что позволило установить его внутри СВЧ-блока в непосредственной близости к диодам. Высокое быстродействие и достаточная чувствительность предложенного термодатчика позволяют минимизировать время отклика системы термокоррекции на изменения температуры.

Алгоритм коррекции. На основе температурных испытаний СВЧ-измерителей мощности с использованием термодатчика в СВЧ-блоке (детекторной камере) был реализован следующий алгоритм термокоррекции:

1. Калибровка. Измеритель мощности прогревался до температуры +30 °С, после чего измерялись значения выходного напряжения детектора при разных уровнях мощности. Показания при указанной температуре считались опорными, относительно которых и проводилась коррекция выходного напряжения детектора.

2. Шкалирование. Для построения корректирующей функции определялись выходные напряжения детектора в температурном диапазоне от 5

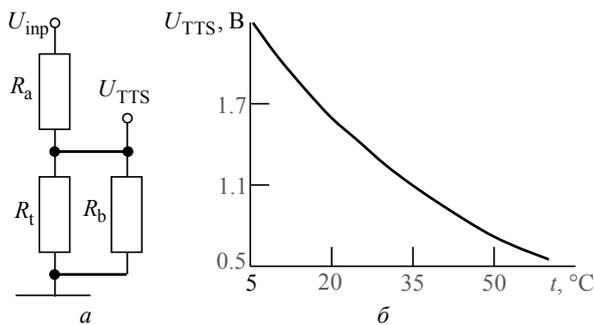


Рис. 7

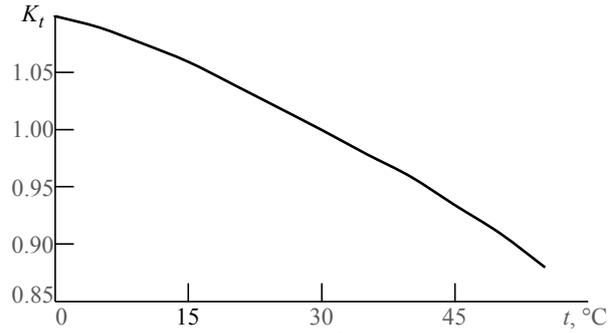


Рис. 8

до 50 °С с шагом около 5°.

3. Нормировка показаний, которая выполнялась делением всех измеренных температурных зависимостей выходного напряжения на опорные характеристики. Полученные характеристики аппроксимировались полиномом второго порядка (рис. 8):

$$K_t = at^2 + bt + c, \quad (3)$$

где a , b , c – коэффициенты корректирующей функции, заносимые в память микроконтроллера.

4. Коррекция показаний. Она производилась делением измеренного значения напряжения, пропорционального уровню мощности входного СВЧ-сигнала, на корректирующий коэффициент K_t , определенный по (3) для температуры, при которой проводились измерения:

$$U = U_{out} / K_t,$$

где U_{out} – показание измерителя мощности.

Проверка работы температурной коррекции.

На рис. 9 представлены результаты температурной коррекции по предложенному алгоритму при фиксированном уровне входной мощности –5 дБм. Они показывают, что в результате коррекции удалось уменьшить изменения показаний детектора с ± 15 % (рис. 9, кривая 2) до ± 1.5 % (кривая 1).

В целом проведенная проверка показала работоспособность термокоррекции с использованием термодатчика в рабочем динамическом диапазоне прибора от –50 до +20 дБм.

Частотная зависимость выходного напряжения для набора температур (рис. 10), построенная в диапазоне от 10 МГц до 20 ГГц, показывает снижение зависимости от температуры по сравнению со схемой детектора без использования термодатчиков (рис. 4).

Заключение. Оба представленных метода компенсации температурных изменений обеспечивают коррекцию, достаточную для широкого круга радиотехнических задач. Параметрическая компенсация, обеспечиваемая включением опорных

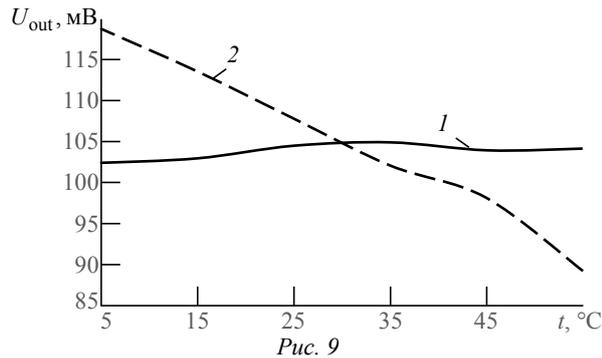


Рис. 9

диодов в цепи делителя, не требует применения микроконтроллера, что упрощает аппаратную часть устройства. Однако при этом снижается чувствительность детектора, что позволяет детектировать сигналы лишь на уровнях мощности выше 0 дБм.

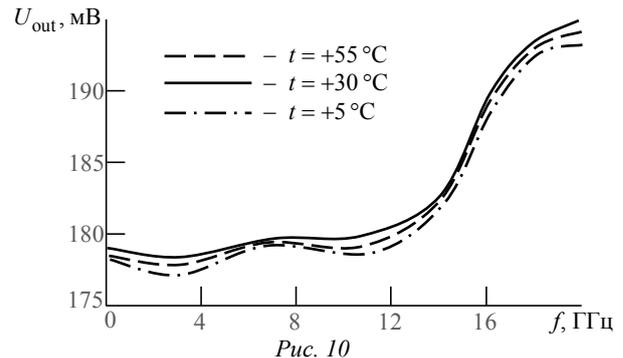


Рис. 10

Коррекция с применением термисторного датчика не ухудшает параметры детектора и с успехом может применяться в измерительном СВЧ-оборудовании с нижней границей чувствительности вплоть до -50 дБм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Билько М. И., Томашевский А. К., Шаров П. П. Измерение мощности на СВЧ. М.: Сов. радио, 1976. 165 с.
2. Planar zero bias Schottky diode detector operating in the E-and W-band / M. Hrobak, M. Sterns, M. Schramm, W. Stein. L.-P. Schmidt // Microwave Conf. (EuMC), Nuremberg, Germany, 6–10 Oct. 2013. Piscataway: IEEE, 2013. P. 179–182.
3. A W-band detector with high tangential signal sensitivity and voltage sensitivity / Linli Xie; Yonghong Zhang; Yong Fan; Conghai Xu; Yuanbo Jiao // 2010 Intern. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Sichuan, China, 08–11 May 2010. Piscataway: IEEE, 2010. P. 528–531.
4. A broad W-band detector utilizing zero-bias direct detection circuitry / Kaida Xu, Yonghong Zhang, Linli Xie, Yong Fan // 2011 Intern. Conf. on Computational Problem-Solving (ICCP), Chengdu, China, 21–23 Oct. 2011. Piscataway: IEEE, 2011. P. 190–194.
5. Eriksson H., Raymond W. A temperature compensated linear diode detector // Wireless Semiconductor Division Agilent Technologies Newark, California. URL: <http://electronix.ru/forum/index.php?act=Attach&type=post&id=13726> (дата обращения: 30.05.2018).
6. The Zero Bias Schottky Diode Detector at Temperature Extremes – Problems and Solutions, Application Note 1090. Agilent Technologies, Inc. 1999. URL: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5966-0784E.pdf?id=1115310> (дата обращения: 30.05.2018).
7. Diode Detector Simulation using Agilent Technologies EEs of ADS Software, Application Note 1156 // Agilent Technologies, Inc. 1999. URL: http://g3ynh.info/circuits/diode_data/AN1156.pdf (дата обращения: 30.05.2018).
8. ZB-28. Zero Bias Diode: Preliminary Datasheet // URL: http://micran.com/sites/micran_eng/data/UserFile/pdf/mmic/ZB-28.pdf (дата обращения: 08.05.2018).
9. Сверхвысокочастотные низкобарьерные детекторные диоды на основе $p-n$ -перехода / И. В. Юнусов, А. Ю. Ющенко, А. М. Плотникова, В. С. Арыков, А. С. Загородный // Изв. вузов. Физика. 2012. № 9–2. С. 294–297.
10. Загородный А. С., Черепанов А. В. Детекторы мощности сигналов СВЧ компании «Микран» // СВЧ-электроника. 2016. № 1. С. 28–32.
11. Нечаев В. Г. Исследование детекторов сигналов СВЧ с двумя измерительными каскадами // Материалы 53-й Междунар. науч. студенческой конф. МНСК-2015 "Радиотехника, электроника, связь", Новосибирск, 14 апр., 2015 г. / НГТУ. Новосибирск, 2015. С. 33.
12. Системы термостатирования в радиоэлектронике: метод. указания для лабораторного практикума по радиофизике и радиоэлектронике / сост.: К. С. Сайкин, В. В. Тогудев; Казанский гос. ун-т. Казань, 1997. 17 с.
13. HSMS-282x. Surface Mount RF Schottky Barrier Diodes: Data sheet // URL: <http://www.farnell.com/datasheets/89546.pdf> (дата обращения: 08.05.2018).
14. PTC-NTC for Surface Mounting Application // URL: <http://www.murata.com/en-eu/products/thermistor/ntc> (дата обращения: 08.05.2017).
15. Шашков А. Г. Терморезисторы и их применение. М.: Энергия, 1967. 320 с.

Нечаев Владимир Геннадьевич – студент 2-го курса магистратуры (2018) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, направление подготовки 11.03.01 «Радиотехника». Автор трех научных работ. Сфера научных интересов – измерение параметров сверхширокополосных сигналов СВЧ-диапазона.

E-mail: ne4aev.volodya@yandex.ru

Загородный Андрей Сергеевич – кандидат технических наук (2014), доцент (2015) кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томского государственного университета систем управления и ра-

диоэлектроники. Ведущий инженер департамента информационно-измерительных систем АО «НПФ "Микран"» в Томске. Автор 22 научных работ. Сфера научных интересов – устройства и компоненты СВЧ.

E-mail: andreyzag@micran.ru

Добриков Александр Иванович – магистр техники и технологий по направлению "Электроника и микродиагностика" (2011), инженер-программист 1-й категории АО «НПФ "Микран"» в Томске. Сфера научных интересов – разработка программного обеспечения для встраиваемых систем; аналоговая и цифровая схемотехника; системы сбора и обработки данных; проектирование измерительного оборудования для СВЧ-применений.

E-mail: dobrikov@micran.ru

REFERENCES

1. Bil'ko M. I., Tomashevskii A. K., Sharov P. P. *Izmerenie moshchnosti na SVCh* [Measurement of Microwave Power]. Moscow, *Sov. radio*, 1976, 165 p. (In Russian)
2. Hrobak M., Sterns M., Schramm M., Stein W., Schmidt L.-P. Planar zero bias Schottky diode detector operating in the E-and W-band. Microwave Conference (EuMC). 6–10 October 2013, Nuremberg, Germany. Piscataway, IEEE, 2013, pp. 179–182.
3. Xie Linli; Zhang Yonghong; Fan Yong; Xu Conghai; Jiao Yuanbo. A W-band detector with high tangential signal sensitivity and voltage sensitivity. 2010 Int. conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 08–11 May 2010, Sichuan, China. Piscataway, IEEE, 2010, pp. 528–531.
4. Xu Kaida, Zhang Yonghong, Xie Linli, Fan Yong. A broad W-band detector utilizing zero-bias direct detection circuitry. 2011 Int. conf. on Computational Problem-Solving (ICCP), 21–23 October 2011, Chengdu, China. Piscataway, IEEE, 2011, pp. 190–194.
5. Eriksson H., Raymond W. A Temperature Compensated Linear Diode Detector. Wireless Semiconductor Division Agilent Technologies Newark, California. Available at: <http://electronix.ru/forum/index.php?act=Attach&type=post &id=13726> (accessed: 30.05.2018).
6. The Zero Bias Schottky Diode Detector at Temperature Extremes – Problems and Solutions, Application Note 1090. Agilent Technologies, Inc. 1999. Available at: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5966-0784E.pdf?id=1115310> (accessed: 30.05.2018).
7. Diode Detector Simulation using Agilent Technologies EEsof ADS Software, Application Note 1156. Agilent Technologies, Inc. 1999. Available at: http://g3ynh.info/circuits/diode_data/AN1156.pdf (accessed: 30.05.2018).
8. ZB-28. Zero Bias Diode: Preliminary Datasheet // Available at: http://micran.com/sites/micran_eng/data/UserFile/pdf/mmic/ZB-28.pdf (accessed: 08.05.2018).
9. Yunusov I. V., Yushchenko A. Yu., Plotnikova A. M., Arykov V. S., Zagorodnii A. S. Super-High-Frequency Low-Barrier Detector Diodes Based on p-n Junction. *Izvestiya vuzov. Fizika* [Russian Physics Journal]. 2012, no. 9–2, pp. 294–297. (In Russian)
10. Zagorodnii A. S., Cherepanov A. V. "Micrane" Microwave Power Detectors. *SVCh-elektronika* [Microwave Electronics]. 2016, no. 1, pp. 28–32. (In Russian)
11. Nechaev V. G. *Issledovanie detektorov signalov SVCh s dvumya izmeritel'nymi kaskadami* [Investigation of Microwave Detectors with Two Measuring Cascades]. Materials of the 53rd Int. Scientific Student Conference of MSSC-2015 "Radio Engineering, Electronics, Communications". Novosibirsk, 14 april, 2015. Novosibirsk State Technical University, 2015, p. 33.
12. Sajkin K. S., Togudev V. V. Temperature Control Systems in Radio Electronics: Technical Tips for Laboratory Practical Work on Radio Physics and Radio Electronics. Kazan University. Kazan, 1997, 17 p. (In Russian)
13. HSMS-282x. Surface Mount RF Schottky Barrier Diodes: Data Sheet. Available at: <http://www.farnell.com/datasheets/89546.pdf> (accessed: 08.05.2018).
14. PTC-NTC for Surface Mounting Application. Available at: <http://www.murata.com/en-eu/products/thermistor/ntc> (accessed: 08.05.2017).
15. Shashkov A. G. *Termorezistory i ih primeneniye* [Thermoresistors and Their Application]. Moscow, *Energiya*, 1967, 320 p. (In Russian)

Received January, 15, 2018

Vladimir G. Nechaev – Master's Student of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: measurement of ultra wideband microwave signals parameters.

E-mail: ne4aev.volodya@yandex.ru

Andrey S. Zagorodny – Ph.D. in Engineering (2014), Associate Professor (2015) of the Department of Microwave and Quantum Radio Engineering of Tomsk State University of Control Systems and Radio electronics. Leading engineer of the Department of Information-Measuring Systems of Research and Production Company "Micran" in Tomsk. The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: microwave devices and components.

E-mail: andreyzag@micran.ru

Alexander I. Dobrikov – Master's Degree in Engineering and Technology in Electronics and Microelectronics (2010). Engineer programmer of the 1st category of Research and Production Company "Micran" in Tomsk. Area of expertise: development of software for embedded systems; analog and digital circuitry; data acquisition and processing systems; design of measuring equipment for microwave applications.

E-mail: dobrikov@micran.ru
