

УДК 621.315.592.2

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОНДОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рахмонов Анвар Тожибоевич, д.ф.-м.н., профессор Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан. e-mail: prof.rahmanov@mail.ru

Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич, д.ф.-м.н., профессор Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан. e-mail: bahrom_prof@mail.ru

Кузнецов Степан Федорович, научный сотрудник Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан.

*Насриддинов Сайфилло Саидович**, д.т.н., доцент, заместитель директора НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз, Ташкент, Узбекистан. e-mail: sfera@yandex.uz.

Облакулова Ирода Шахобиддин кизи, магистр Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкент, Узбекистан.

Аннотация. Приведен анализ погрешностей зондовых преобразователей температуры на основе вероятностных характеристик. Показано, что вероятность появления флуктуационных процессов, т.е., изменение температуры измеряемой и окружающей среды, некоторые отклонения измерительной системы во время функционирования исследуемых зондовых полупроводниковых преобразователей температуры приведены к минимуму из-за однородности конструктивных особенностей.

Ключевые слова: полупроводниковый материал, вероятностная характеристика, распределение, функция распределения.

ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF ERRORS BASED ON PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF THE PROBE SOLID STATE TEMPERATURE TRANSDUCERS

*Rakhmonov Anvar Tojiboevich**, Dr. of Phys. and Math. Sc., Professor of Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: prof.rahmanov@mail.ru

Egamberdiev Bakhrom Egamberdievich, Dr. of Phys. and Math. Sc., Professor of Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: bahrom_prof@mail.ru

Kuznetsov Stepan Fedorovich, Researcher of Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

*Nasriddinov Saifillo Saidovich**, Dr. of Tech. Sc., Ass. Professor, Deputy Director of the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at NUUz, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: sfera@yandex.uz

Oblakulova Iroda Shakhobiddin kizi, Master Student of National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan.

Abstract. An analysis of the errors of probe temperature transducers based on probable characteristics is given. It is shown that the probability of occurrence of fluctuation processes during the operation of the investigated probe semiconductor temperature transducers is minimized due to the uniformity of design features.

Keywords: semiconductor material, probability characteristic, distribution, distribution functions

1. Введение

Особенности анализа и синтеза элементов систем управления и вычислительной техники на базе преобразователей различной физической природы заключаются, с одной стороны, в необходимости раскрытия взаимодействия цепей различной физической природы, а с другой - в необходимости учета пространственного распределения параметров этих цепей, а также выявления источников погрешностей и их распределения [1]. Измерительная система при функционировании с первичными полупроводниковыми преобразователями подвергается воздействию значительного количества неинформативных факторов. Это приводит к возникновению ряда погрешностей измерения. Погрешности, возникающие из-за изменения температуры среды, а также времени эксплуатации можно уменьшить методами автоматической оценки коррекции результатов измерения измерительной системой. Применение дифференциальной схемы первичного измерительного полупроводникового преобразователя температуры, теоретическая оценка статической характеристики измерительной системы и выбор рабочего диапазона измерения позволяют уменьшить приведенную погрешность нелинейного устройства. Погрешность измерения полупроводникового преобразователя температуры также, в значительной степени, зависит от категории точности, которая определяется после обработки результатов экспериментальных наблюдений с применением законов распределения вероятности функционально связанных параметров из результата наблюдений [2].

Известно, что любое измерение и измерительный процесс являются случайными процессами, что характеризуется существенным влиянием на результат измерения внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Исходя из этого, разработанные полупроводниковые преобразователи температуры относятся к различным категориям точности измерения, так как категория точности может быть определена только на основе анализа и закона вероятностных характеристик распределения погрешностей отдельного преобразователя температуры. В работе [3] рассмотрена категория точности преобразователей концентрации на основе вероятностных характеристик испытуемых преобразователей и использован только логарифмический закон распределения, но при этом не учтены частные коэффициенты корреляции, которые существенно влияют при определении категории точности преобразователей концентрации.

2. Результаты и их обсуждение

Ниже рассматривается распределение погрешностей зондовых полупроводниковых преобразователей (ЗПП) температуры дисперсных сред и минерализованных вод на основе вероятностных характеристик. Для оценки характеристик проанализированы фактические результаты измерений изготовленных ЗПП, распределение которых по измерению температуры приведено в табл. 1.

Таблица 1

Количество испытуемых ЗПП температуры

Температура, °С	2	5	7	10	12	15	17	20
Количество преобразователей температуры	6	99	224	221	88	12	228	1104

Погрешность ЗПП зависит от многих причин, имеющих случайный характер, в том числе, от сечения электродов, физических свойств их материалов, температуры окружающей среды, напряжения питания, погрешностей вспомогательного и измерительного устройств. Следовательно, погрешность ЗПП температуры является системой случайных величин.

Вероятность соответствия составляющей погрешности ЗПП температуры категории точности определяется зависимостью [4]

$$P_i = P(C_{hi} \leq \eta_i \leq C_{bi}), \quad (1)$$

где C_{hi} , C_{bi} - соответственно нижнее и верхнее допустимые значения погрешности ЗПП температуры, η_i - категория точности.

Для выбора теоретического распределения использованы критерии согласия Колмогорова-Смирнова. В табл. 2 приведены виды закона наилучшего согласия, параметры распределения и вероятность согласия.

Таблица 2

Законы и параметры распределения

Погрешность	Закон распределения	Параметры распределения		Вероятность согласия
		a	b	
Систематическая, η_c	Нормальный	-0,00398	0,0431	0,0003
Гистерезис, η_h	Релея	-	0,0201	0,0004
СКО, η_δ	Логарифмический	-6,12	0,932	0,56
Нелинейность, $\eta_{нел}$	Нормальный	0,0311	0,0392	0,02

Из табл. 2 видно, что вероятность согласия существенно возрастает по распределению погрешности результатов измерения полупроводниковыми преобразователями температуры, где среднее квадратическое отклонение (СКО) подчиняется логарифмическому закону, так как при этом вероятность согласия полупроводниковых преобразователей температуры составляет 0.56. Количественная оценка вероятности установлена с помощью точечной оценки и нижней доверительной границы, которая описывается уравнением для составляющей погрешности ЗПП температуры

$$P = 1 - \frac{q}{N}, \quad (2)$$

где q - количество ЗПП, у которых составляющая погрешности не соответствует допускаемым значениям; N - количество испытуемых ЗПП.

Нижняя доверительная граница для вероятности P_h определена по таблицам и описывается выражением [5, 6],

$$P_h = f_1(N, d, q), \quad (3)$$

где f_1 - квантиль бета-распределения, d - диаметр датчика.

Следует отметить, что ЗПП имеют определенную точность измерения, поэтому испытуемые ЗПП следует отнести к соответствующей категории точности. При этом все составляющие погрешности должны соответствовать допускаемым значениям для этой категории точности. Следовательно, вероятность соответствия ЗПП категории точности [7, 8] определяется уравнением в виде

$$P_n = P[\prod_{i=1}^m (C_{hi} \leq \eta_i \leq C_{bi})], \quad (4)$$

где m - составляющие погрешности ЗПП.

Табличное t -значение распределения Стьюдента для $N - m$ степеней свободы и уровня значимости 0,01 равно 1,6 [9]. В табл. 3 приведены частные коэффициенты корреляции ct -значением. Как видно, более тесная зависимость наблюдается между гистерезисом и средней квадратичной ошибкой точности по формулам (5) и (6).

Таблица 3

Частные коэффициенты корреляции

Обозначение погрешности	η_h	η_δ	$\eta_{нел}$
η_c	0,28	0,11	- 1,49
η_h	-	4,72	- 0,51
η_δ	-	-	- 1,13

Вероятность появления, т.е., изменение температуры измеряемой и окружающей среды, некоторые отклонения измерительной системы процессов во время функционирования исследуемых ЗПП температуры приведены к минимуму из-за однотипности конструктивных особенностей, т.к. величины категории точности, вычисленные по вышеуказанным формулам, максимально приблизились к истинному.

Вычисленные значения P и P_i при доверительной вероятности 0,9 для соответствующих погрешностей и ЗПП в соответствии с (4.57) и (4.58) приведены в табл.4.

Таблица 4

Значение вероятностей для категорий точности

Системы	Значение вероятностей для категорий точности						
	0,02	0,04		0,06		0,1	
	P	P	P	P	P_i		P_i
η_c	0,089	0,324	-	0,598	-	0,988	0,981
η_h	0,514	0,921	0,912	0,978	0,971	0,990	0,982
η_δ	0,826	0,962	0,928	0,967	0,952	0,996	0,986
$\eta_{нел}$	0,324	0,544	-	0,678	-	0,949	0,941
η_h, η_δ	0,481	0,891	-	0,954	0,964	0,978	0,968
$\eta_h, \eta_\delta, \eta_{нел}$	0,112	0,498	-	0,725	-	0,938	0,921
$\eta_c, \eta_h, \eta_\delta, \eta_{нел}$	0,119	0,321	-	0,521	-	0,945	0,934

Табличные данные показывают, что, в основном, большинство ЗПП (93,4%) соответствует категории точности 0,04-0,1. Для категории точности 0,02-0,04 максимальное значение вероятности согласия к системам η_h и η_δ , соответственно, составляет 0,825-0,962, а также к системам η_h, η_δ 0,481-0,891, а для $\eta_c, \eta_h, \eta_\delta, \eta_{нел}$ значение вероятности согласия составляет всего лишь 0,119-0,321.

3. Заключение

На категории точности зондовых полупроводниковых преобразователей температуры существенно могут влиять конструктивные особенности, связанные с геометрическими параметрами, а также точности изготовления преобразующих элементов, в конечном итоге, приводящие к нелинейности выходных характеристик зондовых полупроводниковых преобразователей температуры [10].

Нелинейность и систематическая составляющая погрешности зондовых полупроводниковых преобразователей также могут влиять на значение вероятностей для категорий точности, т.к. при этом наблюдается отклонение статической характеристики зондовых полупроводниковых преобразователей от номинальной, что приводит к флуктуации межцепных функций $k_1(I_1, U_i)$, $k_2(I_1, I_i)$, особенно, коэффициентов преобразования $k_3[x_{\text{вх}}, k_4(U_i, U_2)]$, $k_5[x_{\text{вх}}, k_6(I_i, U_1)]$ (где I , U - токи напряжение преобразователя соответственно, $x_{\text{вх}}$ - входной сигнал) и снижению точности преобразования входного параметра. Однако эти погрешности являются лимитирующими.

Литература

1. Пустильник Е.И. Статические методы анализа и обработки наблюдений, 2008, Publ. Наука, p. 220.
2. Гордецкий А. Ф. Основы физики полупроводников и полупроводниковых приборов. - 2008. - Наука, p. 220.
3. Акимов С.К. Анализ вероятностных характеристик преобразователей концентрации минерализованных сред. Материалы Международной конференции по экологии «Иновация-2006», Свердловск, 2006.
4. А.Т. Рахманов Зондовые параметрические преобразователи информации. Ташкент, 2010, с. 160.
5. N.K. Арипджанов, Шипулин Надежность и достоверность работ цифровых устройств. Ташкент, 2003, с. 73.
6. В.И. Коряков А.С. Запорожец Оценка метрологических характеристик преобразователей температуры и диэлектрических влагомеров с использованием стандартных образцов. Измерительная техника, 2001, № 4, с. 1. стр. 48.
7. А.М. Меньшиков Методическая погрешность калибровки диэлектрических влагомеров с использованием имитаторов влажности, Измерительная техника, 2008, № 7. п. 49.
8. А.К. Алексеев Теории вероятностей полупроводниковых информационно-измерительных систем. Инфосфера. 2014. с. 224.
9. Дж. Купер, К. Макгиллем Вероятностные методы анализа сигналов и систем. Мир, 2009, с. 376.
10. Насриддинов С. С. Разработка методов компенсации погрешностей измерительных преобразователей на основе полупроводниковых датчиков. Разработка методов компенсации погрешности измерительных преобразователей на основе полупроводниковых датчиков // Журнал. Проблемаэнергоиресурсоснабжение. Ташкент. 2015, 1-2, -S.198-204.

References

- 1 Pustil'nik E.I. *Sticheskie metody analiza i obrabotki nablyudenii* [Static methods for analyzing and processing observations], 2008, Publ. Nauka, p. 220.(In Russ.)
2. Gordetskii A.F. *Osnovy fiziki poluprovodnikov i poluprovodnikovykh priborov* [Fundamentals of physics of semiconductors and semiconductor devices], 2008, Publ. Nauka, p. 220.(In Russ.)
3. Akimov S.K. Analysis of probabilistic characteristics of converters of concentration of mineralized media. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii po ekologii "Inovatsiya-2006"* [Materials of the International Conference on Ecology "Innovation-2006"], Sverdlovsk, 2006.(In Russ.)
- 3.A.T. Rakhmanov *Zondovye parametricheskie preobrazovateli informatsii* [Probe Parametric Information Converters]. Tashkent, 2010, p. 160. (In Russ.)

4. N.K. Aripdzhanov, Shipulin *Nadezhnost' i dostovernost' raboty tsifrovyykh ustroystv* [Reliability and reliability of digital devices]. Tashkent, 2003, p. 73. (In Russ.)
 5. V.I. Koryakov, A.S. Zaporozhets Evaluation of the metrological characteristics of temperature transducers and dielectric moisture meters using standard samples. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring Equipment], 2001, no. 1. p. 48.(In Russ.)
 6. A.M. Men'shikov Methodical error of calibration of dielectric moisture meters using moisture simulators, *Izmeritel'naya tekhnika*[Measuring Equipment], 2008, no.7. p. 49.(In Russ.)
 7. A.K. Alekseev *Teorii veroyatnostei poluprovodnikovyykh informatsionno-izmeritel'nykh sistem* [Probability Theories of Semiconductor Information Measuring Systems]*Infosfera* [Infosphere], 2014, p. 224.(In Russ.)
 8. Dzh. Kuper, K. Makgillem Probabilistic Methods of Signal and System Analysis. Mir Publ., 2009, p. 376.(In Russ.)
 9. Nasriddinov S.S. *Razrabotka metodov kompensatsii pogreshnostey izmeritel'nykh preobrazovateley na osnove poluprovodnikovyykh datchikov.* [Development of error compensation methods for measuring transducers based on semiconductor sensors] // *Zhurnal. Problema energo i resursosnabzheniye. Tashkent. 2015, 1-2, -S.198-204.*[Journal.The problem of energy and resource supply.Tashkent. 2015, 1-2, -C.198-204]
-

The text of the article was translated by Editorial Team of journal of “Semiconductor Physics and Microelectronics”. For more information contact: ispm_uz@mail.ru

1.Introduction

Features of the analysis and synthesis of elements of control systems and computer technology based on converters of various physical nature are, on the one hand, the need to disclose the interaction of circuits of different physical nature, and on the other, the need to take into account the spatial distribution of the parameters of these circuits, as well as identify sources of errors and their distribution [1]. The measuring system, when operating with primary semiconductor converters, is exposed to a significant number of non-informative factors. This leads to a number of measurement errors. Errors arising from changes in the temperature of the medium, as well as the operating time, can be reduced by the methods of automatic evaluation of the correction of the measurement results by the measuring system. The use of the differential circuit of the primary measuring semiconductor temperature converter, the theoretical assessment of the static characteristics of the measuring system, and the choice of the operating measurement range allow us to reduce the reduced error of the nonlinear device. The measurement error of a semiconductor temperature transducer also largely depends on the accuracy category, which is determined after processing the results of experimental observations using the laws of probability distribution of functionally related parameters from the observation result [2].

It is known that any measurement and measurement process are random processes, which is characterized by a significant influence on the measurement result of external and internal destabilizing factors. Based on this, the developed semiconductor temperature transducers belong to different categories of measurement accuracy, since the accuracy category can only be determined on the basis of analysis and the law of the probability characteristics of the error distribution of an individual temperature transducer. In [3], the accuracy category of concentration transducers was considered on the basis of the probabilistic characteristics of the tested transducers and only the logarithmic distribution law was used, but the partial correlation coefficients, which significantly affect the determination of the accuracy category of concentration transducers, were not taken into account.

2.Result and discussion

Below we consider the error distribution of probe semiconductor converters (PSC) for the temperature of dispersed media and mineralized water based on probabilistic characteristics. To evaluate the characteristics, the actual measurement results of the manufactured PSCs are analyzed, the distribution of which by temperature measurement is given in Table 1.

Table 1

The number of test subjects PSC temperature

Temperature, °C	2	5	7	10	12	15	17	20
Number of temperature transmitters	6	99	224	221	88	12	228	1104

The error of the PSC depends on many random causes, including the cross section of the electrodes, the physical properties of their materials, ambient temperature, supply voltage, and errors of auxiliary and measuring devices. Consequently, the error of the PSC temperature is a system of random variables.

The probability of correspondence of the component of the error of the PSC temperature accuracy category is determined by the dependence [4]

$$P_i = P(C_{hi} \leq \eta_i \leq C_{bi}), \quad (1)$$

where C_{hi} , C_{bi} are the lower and upper permissible values of the error of the PSC temperature, respectively, η_i - accuracy category.

To select the theoretical distribution, the Kolmogorova-Smirnova agreement criteria were used in the table. 2 shows the types of law of best agreement, distribution parameters and probability of agreement.

Table 2

Laws and distribution parameters

Error	Law distribution	Distribution parameters		Probability of agreement
		<i>a</i>	<i>b</i>	
Systematic, η_s	Normal	-0,00398	0,0431	0,0003
Hysteresis, η_h	Rayleigh	-	0,0201	0,0004
SD, η_δ	Logarithmic	-6,12	0,932	0,56
Nonlinearity, η_{non}	Normal	0,0311	0,0392	0,02

From the table. 2 shows that the probability of agreement increases significantly with respect to the distribution of the error in the measurement results of semiconductor temperature transducers, where the standard deviation (SD) is obeyed by the logarithmic law, since the probability of agreement of the semiconductor temperature transducers is 0.56. A quantitative estimate of the probability is established using a point estimate and a lower confidence boundary, which is described by the equation for the error component of the PSC temperature

$$P = 1 - \frac{q}{N}, \quad (2)$$

where q - the number of PSCs for which the error component does not correspond to the permissible values; N - the number of tested PSCs.

The lower confidence limit for the probability P_h is determined by the tables and is described by the expression [5, 6],

$$P_h = f_1(N, d, q), \quad (3)$$

where f_1 - beta quantile, d - sensor diameter.

It should be noted that the PSC have a certain measurement accuracy, therefore, the tested PSC should be attributed to the corresponding accuracy category. Moreover, all components of the error must correspond to the permissible values for this category of accuracy. Therefore, the probability of compliance of the PSC accuracy category [7, 8] is determined by the equation in the form

$$P_n = P[\prod_{i=1}^m (C_{hi} \leq \eta_i \leq C_{bi})], \quad (4)$$

where m - component errors PSC.

The tabular t-value of the Student distribution for $N-m$ degrees of freedom and significance level of 0,01 is 1,6 [9]. In the table. Figure 3 shows the partial correlation coefficients with the t-value. As you can see, a closer relationship is observed between the hysteresis and the mean square error of accuracy according to formulas (5) and (6).

Table 3

Partial correlation coefficients

Error designation	η_h	η_δ	η_{nel}
η_c	0,28	0,11	- 1,49
η_h	-	4,72	- 0,51
η_δ	-	-	- 1,13

The likelihood of occurrence, i.e., a change in the temperature of the measured and the environment, some deviations of the measuring system of processes during the functioning of the investigated PSC temperatures are minimized. It is due to the uniformity of design features, because values of the accuracy category calculated by the above formulas are as close as possible to the true one.

The calculated values of P and P_i with a confidence probability of 0,9 for the corresponding errors and the PSC in accordance with (4.57) and (4.58) are given in table 4.

Table 4

Probability value for accuracy categories

Systems	Probability value for accuracy categories						
	0,02	0,04		0,06		0,1	
	P	P	P	P	P_i		P_i
η_c	0,089	0,324	-	0,598	-	0,988	0,981
η_h	0,514	0,921	0,912	0,978	0,971	0,990	0,982
η_δ	0,826	0,962	0,928	0,967	0,952	0,996	0,986
η_{non}	0,324	0,544	-	0,678	-	0,949	0,941
η_h, η_δ	0,481	0,891	-	0,954	0,964	0,978	0,968
$\eta_h, \eta_\delta, \eta_{non}$	0,112	0,498	-	0,725	-	0,938	0,921
$\eta_c, \eta_h, \eta_\delta, \eta_{non}$	0,119	0,321	-	0,521	-	0,945	0,934

Tabular data show that, basically, the majority of PSC (93.4%) corresponds to the accuracy category 0,04-0,1. For the accuracy category 0,02-0,04, the maximum value of the probability of agreement with the systems η_h and η_δ , respectively, is 0,825-0,962, as well as with the systems η_h, η_δ 0,481-0,891, and for $\eta_c, \eta_h, \eta_\delta, \eta_{non}$ value of the probability of agreement is only 0,119-0,321.

3. Conclusion

The accuracy categories of probe semiconductor converters of temperature can be significantly affected by design features associated with geometric parameters, as well as the accuracy of the manufacturing of converting elements, ultimately leading to non-linear output characteristics of probe semiconductor temperature converters [10].

The nonlinearity and systematic component of the error of probe semiconductor converters can also affect the value of probabilities for accuracy categories. Since at the same time, the static characteristic of the probe semiconductor converters deviates from the nominal, which leads to fluctuations of interchain functions $k_1(I_1, U_i)$, $k_2(I_1, I_i)$, especially the conversion coefficients $k_3[x_{BX}, k_4(U_i, U_2)]$, $k_5[x_{BX}, k_6(I_i, U_1)]$ (where I, U are currents of the converter voltage, respectively, x_{BX} input signal) and reduce the accuracy of conversion of the input parameter. However, these errors are limiting.

