

УДК 621.317.7

В. П. Куценко^{1,2} (канд. техн. наук, доц.), О.П. Яненко³ (д-р техн. наук, проф.)

1) ГВУЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк, Україна

2) Державне науково-виробниче підприємство „Кварсит”, м. Костянтинівка, Україна

3) Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ, Україна

E-mail: donetsk50@mail.ru**ВИМІРЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАДІОМЕТРИЧНИХ ПРИЛАДІВ КОНТРОЛЮ**

Для метрологічного забезпечення радіометричних приладів контролю розроблений зразковий генератор НВЧ-діапазона з тепловим джерелом електромагнітного шуму. З його допомогою розраховані частотна залежність, щільність ймовірності та параметри розподілу результатів вимірювань чутливості радіометра.

Ключові слова: зразковий генератор, радіометр, електромагнітний шум, контроль, метрологія.

Вступ

Розробка високочутливих радіометричних приладів контролю (РПК) потребує наявності еталонних, або зразкових генераторів шуму. Особливо гостро стає дане питання при вимірюванні випромінювання малої інтенсивності в НВЧ-діапазоні (неруйнівний контроль складу та властивостей матеріалів та виробів), коли потребується застосування нестандартизованої радіометричної апаратури [1], [2].

Для метрологічного забезпечення РПК використовується розроблений зразковий генератор НВЧ-діапазона з тепловим джерелом електромагнітного шуму [3]. Для зменшення величини похибки вимірювань застосовується метод заміщення.

Постановка задачі дослідження

Проведення вимірювання метрологічних характеристик РПК за допомогою розробленого зразкового генератора шуму (ГШ) з максимальним рівням спектральної щільності потужності шуму (СЩПШ) на його виході $4,5 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц.

Основна частина

Метрологічні характеристики радіометричного приладу контролю (РПК) вимірювались за допомогою розробленого зразкового генератора шуму (ГШ) з максимальним рівням спектральної щільності потужності шуму (СЩПШ) на його виході $4,5 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц, що відповідає інтегральній потужності у смузі аналізуємих частот $P_{ВШХ} = 4,5 \cdot 10^{-13}$ Вт [3].

Рівень потужності шуму на вході РПК регулювався зразковим поляризаційним атенуатором ДЗ-37 в межах від $6,5 \cdot 10^{-15}$ до $4,5 \cdot 10^{-13}$ Вт, що повністю перекривало діапазон потужностей ЕМВ, які виникають при контролі ситало-керамічних виробів.

На виході РПК рівень потужності, що вимірювалася, контролювався за допомогою аналогового вольтметра, показання якого носили флуктуаційний характер. Спостерігався розкид показань біля деякого (середнього) значення. Враховуючи, що відхилення складали порівняльно малу (10-15%) частину від деякого середнього значення і серед заважаючих причин, що обумовлюють розкид, не було домінуючої, можна вважати, що показання вольтметра мають нормальний розподіл.

Отже, для визначення середнього значення, що приймається за вимірюване, і довірчого інтервалу, що визначає похибку вимірювань, можна користуватися відомими методами математичної статистики [4].

В ході експериментального визначення метрологічних характеристик РПК дія кожної точки, що відповідає функціональній залежності проводилось 10...20 вимірювань (X_i де $i = 1$, а $n = 10...20$), середнє значення яких визначалось за формулою:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}, \quad (1)$$

а середньо квадратичне відхилення:

$$S(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}. \quad (2)$$

Потім задаючись довірчою імовірністю $P = 0,95$ та визначивши за таблицею нормоване вибіркоче відхилення нормального розподілу t_G (наприклад, за таблицею П-6 [4]), перевірялось, чи не є якийсь із вимірів „промахом”, тобто, при:

$$|X_R - \bar{X}| \geq t_G S(X) \quad (3)$$

вимір X_R відкидався.

При цьому похибка вимірювань визначалась за формулою:

$$\varepsilon(P) = t(P, n) \cdot S(\bar{X}), \quad (4)$$

де $S(\bar{X}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}$; $P=0,95$ – довірна можливість; $t(P, n)$ – коефіцієнти, що визначаються із розподілу Стюдента, наприклад, за таблицею П-7 [4] для $P = 0,95$ та кількості вимірювань $n = 10...20$.

Як показала обробка експериментальних даних у всіх випадках, похибка вимірювання не перевищувала 15%.

Описана методика обробки результатів вимірювань застосовувалась до всіх представлених нижче метрологічних характеристик. На рис.1 представлена залежність вихідної напруги (U) РПК від частоти (f).

При потужності на вході РПК сигналу від ГШ на рівні $P_{ВМХГ} = 4,5 \cdot 10^{-13}$ Вт максимальне значення його вихідної напруги $U_0 = 0,96$ В відповідає $f \approx 45$ ГГц. Нижня границя відповідає $f_H \approx 37$ ГГц, а верхня $f_B \approx 53$ ГГц. Відповідно приведені характеристики всі наступні характеристики вимірювались в 3-х точках робочого діапазону: $f_H \approx 37$ ГГц, $f_O = 45$ ГГц, $f_B \approx 53$ ГГц.

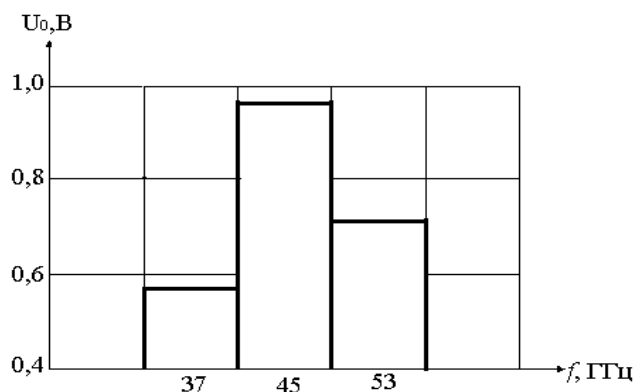


Рисунок 1 – Частотна залежність вихідної напруги індикатора РПК

На рис. 2 приведені градувальні (статичні) характеристики РПК, тобто залежність напруги U_0 на виході РПК від вхідної потужності $P_{вх}$, рівень якої визначався, як вказано вище, затуханням зразкового атенюатора ($P_{вих}$).

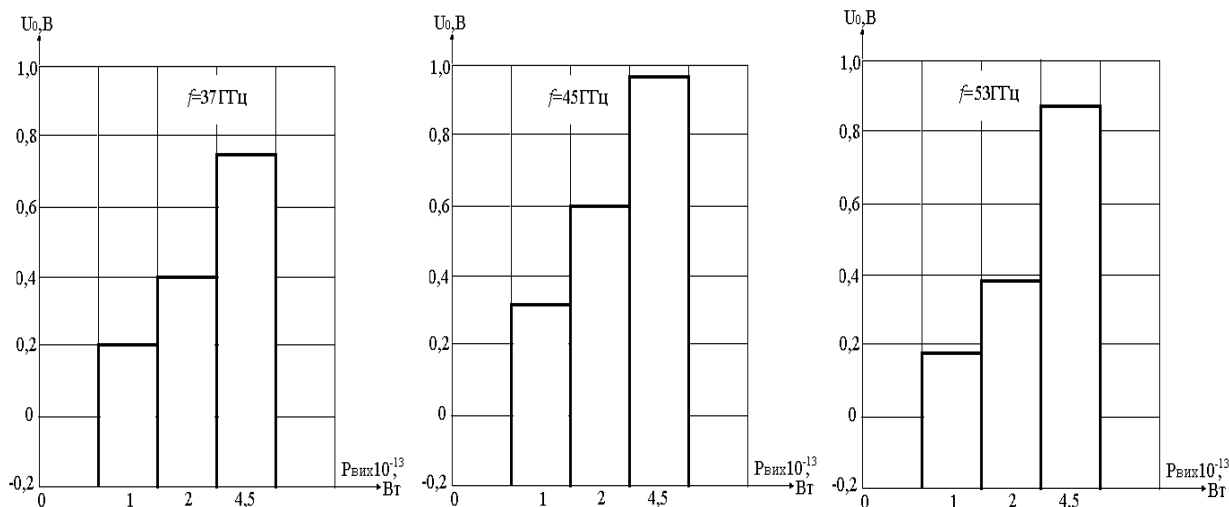


Рисунок 2 – Залежності напруги на виході РПК від потужності на його вході

Із приведених градувальних (статичних) характеристик видно, що для всіх частот маємо достатньо лінійні ділянки залежності напруги на виході РПК від потужності на його вході.

Оскільки похибка установки вказаної потужності ($P_{вих}$) визначалось шкалою атенюатора, яка є логарифмічною (відлік ведеться в децибелах), то для оцінки величини порогу чутливості РПК зручно користуватися логарифмічною залежністю напруги на його виході U_0 від потужності на вході.

Із рис. 3 видно, що при частоті 37ГГц РПК починає реагувати на рівень потужності, приблизно дорівнює $2 \cdot 10^{-14}$ Вт і вище, тобто поріг чутливості установки не перевищує вказаної величини.

Для частоти 45ГГц поріг чутливості не перевищує $1,5 \cdot 10^{-14}$ Вт, а для частоти 53ГГц приблизно $2 \cdot 10^{-14}$ Вт (рис. 3).

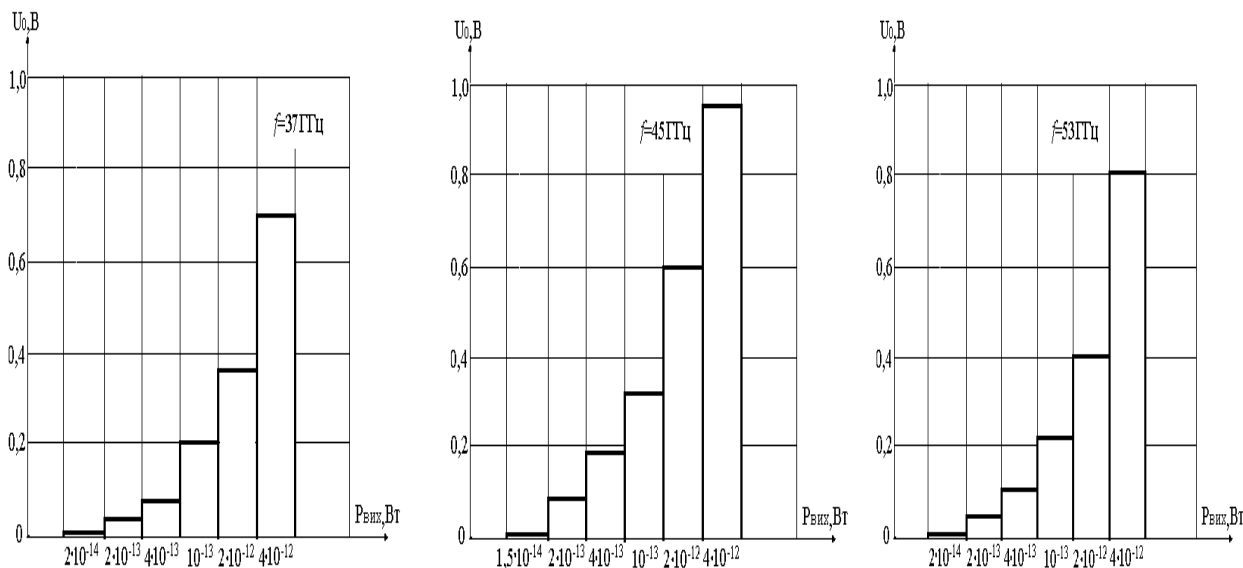


Рисунок 3 – Залежності напруги індикатора від вхідної потужності для визначення чутливості РПК

Таким чином, можна вважати, що чутливість РПК приблизно дорівнює $2 \cdot 10^{-14}$ Вт.

Також була виміряна частотна залежність чутливості РПК, для кожної частотної точки проводилось 5-10 вимірів, результати яких оброблялися методами математичної статистики (див. вище).

Для кожного значення частоти визначалось середнє значення U_0 , після чого будувався графік, який приведений на рис 4.

Як слідує із графіка, даний рівень більше порогу чутливості системи у всьому робочому діапазоні частот. Деяка невідповідність для трьох частот 37, 45 і 53 ГГц з даними, представленими на рис. 3, викликано, скоріш за все меншим числом вимірів при знятті залежності чутливості від частоти.

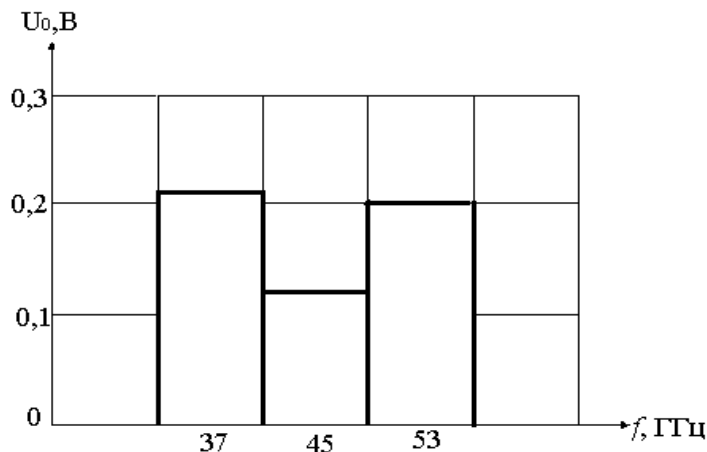


Рисунок 4 – Частотна залежність чутливості РПК

Таким чином, приведені вище результати вимірювання метрологічних характеристик РПК свідчать про його високу чутливість та широкосмуговість, що при наявності розробленого атестованого зразкового генератора електромагнітного шуму підвищує достовірність контролю властивостей ситало-керамічних виробів і розширює область застосування розробленого приладу.

Аналогічно проведені вимірювання метрологічних характеристик інших розроблених РПК.

Обробка результатів вимірювань

Вихідна напруга РПК (потужність) вимірювалась при постійному значенні потужності на вході або частоти гетеродина (в залежності від характеристики, яка вимірювалась) за допомогою аналогового вольтметра, для обробки результатів застосовували методи математичної статистики. Потім визначалось середнє значення та похибка вимірювань у припущенні, що показання вольтметра є випадкова величина, яка розподілена за нормальним законом. Для перевірки цієї гіпотези були проведені вимірювання вихідної напруги радіометричної системи на частоті $f = 45$ ГГц при трьох значеннях вхідної потужності: $P_{вх} = 4,5 \cdot 10^{-13}$ Вт (табл. 1), $1,1 \cdot 10^{-13}$ Вт (табл. 2) і $3 \cdot 10^{-14}$ Вт (табл. 3).

Таблиця 1

0,95	0,95	0,96	0,99	0,95	0,97	0,96	0,98	0,96	0,97
0,96	0,95	0,96	0,99	0,96	0,95	0,99	0,97	0,97	0,96
0,93	0,94	0,96	0,98	0,97	0,94	0,98	0,97	0,96	0,98
0,95	0,93	0,94	0,97	0,96	0,96	0,97	0,95	0,97	0,98
0,94	0,95	0,95	0,96	0,95	0,96	0,97	0,98	0,96	0,97
0,95	0,93	0,96	0,96	0,95	0,95	0,96	0,97	0,95	0,97
0,95	0,95	0,97	0,94	0,96	0,96	0,96	0,98	0,98	0,98
0,96	0,98	0,96	0,97	0,96	0,97	0,96	0,98	0,97	0,96
0,93	0,97	0,97	0,95	0,98	0,99	0,97	0,96	0,97	0,95
0,96	0,94	0,98	0,94	0,95	0,98	0,98	0,98	0,95	0,94

Таблиця 2

0,34	0,38	0,35	0,32	0,36	0,36	0,38	0,25	0,31	0,29
0,36	0,35	0,34	0,36	0,35	0,41	0,35	0,31	0,32	0,33
0,34	0,29	0,34	0,34	0,40	0,30	0,28	0,32	0,26	0,30
0,35	0,37	0,39	0,34	0,41	0,38	0,33	0,34	0,33	0,34
0,33	0,28	0,38	0,29	0,39	0,40	0,31	0,33	0,35	0,36
0,30	0,35	0,34	0,33	0,33	0,39	0,35	0,28	0,35	0,40
0,34	0,30	0,35	0,36	0,33	0,38	0,35	0,36	0,31	0,34
0,37	0,31	0,30	0,30	0,32	0,42	0,34	0,40	0,36	0,31
0,36	0,37	0,35	0,34	0,31	0,44	0,36	0,39	0,34	0,36
0,35	0,33	0,34	0,38	0,41	0,36	0,33	0,37	0,30	0,38
0,33	0,35	0,30	0,31	0,28	0,33	0,30	0,31	0,32	0,33

Таблиця 3

0,10	0,09	0,10	0,11	0,08	0,03	0,12	0,07	0,06	0,16
0,11	0,03	0,11	0,08	0,09	0,01	0,15	0,06	0,10	0,12
0,12	0,10	0,06	0,14	0,13	0,07	0,13	0,11	0,08	0,05
0,07	0,06	0,09	0,07	0,14	0,08	0,09	0,16	0,09	0,07
0,08	0,15	0,06	0,13	0,13	0,00	0,01	0,14	0,05	0,09
0,07	0,06	0,09	0,10	0,08	0,03	0,00	0,07	0,00	0,02
0,06	0,08	0,08	0,03	0,13	0,06	0,06	0,02	0,00	0,03
0,06	0,12	0,11	0,08	0,08	0,09	0,03	0,11	0,04	0,00
0,14	0,11	0,11	0,10	0,07	0,10	0,08	0,00	0,12	0,02
0,11	0,09	0,04	0,05	0,07	0,10	0,10	0,05	0,09	0,12
0,10	0,13	0,05	0,12	0,10	0,03	0,09	0,04	0,18	0,12

Далі проводилась статистична обробка даних таблиць. Діапазон розкиду показань вольтметра був розбитий на рівні проміжки і результати вимірювань були згруповані по цим проміжкам, після чого будувалась гістограма, висота стовпчиків якої дорівнює частині загальної кількості вимірювань, яка опинилась у тому чи іншому інтервалі гістограми.

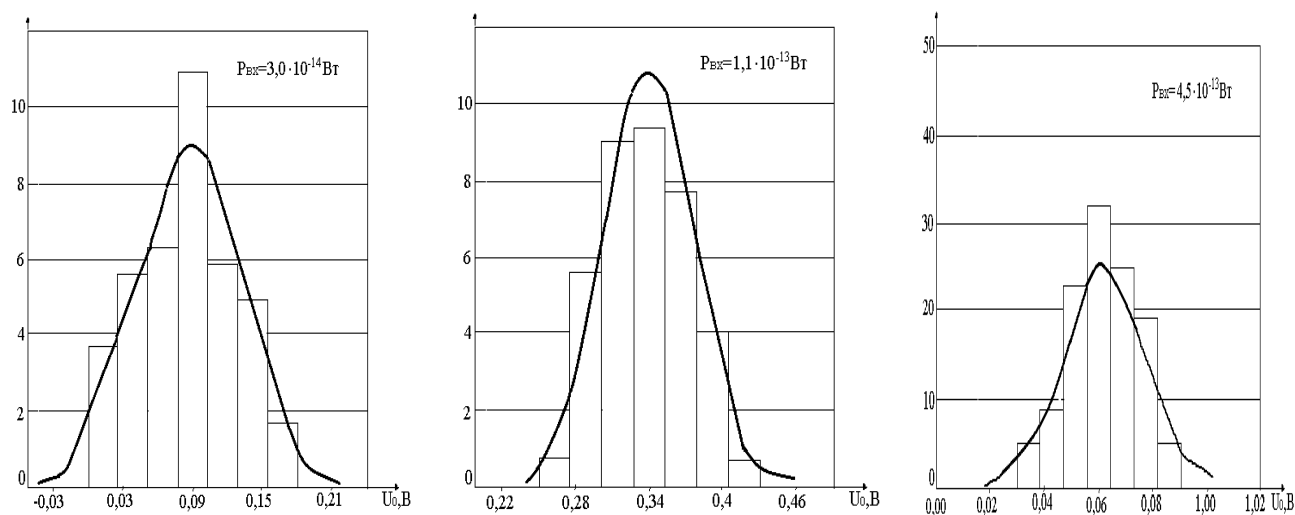


Рисунок 5 – Гістограми щільності ймовірності та параметри розподілу результатів вимірювань

На рис. 5 приведені гістограми, а також апроксимуючі їх криві щільності розподілу та статистичні параметри для трьох рівнів вхідної потужності. Як видно з рисунків, розподіл близький

до нормального, тому при розрахунку похибок вимірювань можна користуватися формулами для нормального розподілу, які приведені в даному підрозділі.

Припускаючи, що довірча ймовірність дорівнює 0,95, довірчий інтервал можна розрахувати за формулою:

$$\Delta = t(P, n) \cdot S(\bar{X}). \quad (5)$$

Для числа вимірювань $n = 100$, $t(0,95;100) = 1,96$. Величина $S(\bar{X})$ визначається за формулою:

$$S(\bar{X}) = \frac{S(X)}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

де $S(X)$ є середньоквадратичне відхилення, яке згідно даних розрахунку (див. рис. 5), дорівнює для вказаних рівнів потужності відповідно 0,0147; 0,036 і 0,041 при середніх значеннях \bar{X} 0,96; 0,34 і 0,084. Таким чином, згідно наведеним формулам довірчий інтервал Δ дорівнює 0,003 (для вхідної потужності $4,5 \cdot 10^{-13}$ Вт); 0,007 (для $1,1 \cdot 10^{-13}$ Вт) та 0,008 (для $3 \cdot 10^{-14}$ Вт). Визначаючи відносну похибку за формулою:

$$\delta = \frac{S(X)}{\bar{X}} 100\% \quad (7)$$

отримаємо для приведених раніше рівнів потужності такі значення:

$P_{вх}, \text{Вт}$	$\delta, \%$
$4,5 \cdot 10^{-13}$	0,3
$1,1 \cdot 10^{-13}$	2,1
$0,3 \cdot 10^{-13}$	10

Як видно, похибка зростає зі зменшенням рівня вхідної потужності, але не перевершує 10%. Отже при проведенні вимірювань можна вважати, що показання вольметра виявляються випадковою величиною, яка розподілена згідно нормального закону, і при обробці результатів можна користуватися відповідними формулами. Але оскільки похибка зростає зі зменшенням кількості вимірювань (n) згідно закону $n^{-1/2}$, то для рівнів потужності біля порогу чутливості РПК необхідно збільшити $n \geq 20$ та користуватися комп'ютерними методами обробки інформації.

Висновки

1. Використання розробленого авторами зразкового генератора для вимірювання метрологічних характеристик радіометричних приладів контролю показує, що розподіл щільності ймовірності та параметрів результатів вимірювань близькі до нормального закону.
2. Встановлено, що довірчий інтервал дорівнює відповідно 0,003 для потужності вхідного сигналу $4,5 \cdot 10^{-13}$ Вт, 0,007 для $1,1 \cdot 10^{-13}$ Вт та 0,008 для $3 \cdot 10^{-14}$ Вт.
3. Похибка вимірювань зростає зі зменшенням рівня потужності вхідного сигналу та кількості вимірювань, але не перевершує 10%.

Перелік використаної літератури

1. Куценко В.П. Радіометричний НВЧ-контроль властивостей матеріалів / [В.П. Куценко, Ю.О. Скрипник, М.Ф. Трегубов и др.]. – Донецьк : ПІШ «Наука і освіта», 2012. – 348 с.
2. Куценко В.П. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / [В.П. Куценко, Ю.А. Скрипник, Н.Ф. Трегубов и др.]. – Донецьк: ПІШ «Наука і освіта», 2011. – 324 с.
3. Куценко В.П. Зразковий генератор шуму НВЧ-діапазону для метрологічного забезпечення радіометричних приладів контролю / В.П. Куценко, О.П. Яненко // Науково-теоретичний журнал „Штучний інтелект”. – 2013. – Вип. 2/2013.
4. Рабинович С.Г. Погрешности измерений / С.Г. Рабинович. - Л.: Энергия, 1978 – 261 с.

Надійшла до редакції:
18.03.2013

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Зорі А.А.

В.П. Куценко, О.П. Яненко

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Казенное научно-производственное предприятие "Кварсит", Национальный технический университет Украины «КПИ»

Радиометрическая система для измерения толщины стенки обтекателей на рабочем месте при их механической обработке. Измерение метрологических характеристик радиометрических приборов контроля. Для метрологического обеспечения радиометрических приборов контроля разработан образцовый генератор СВЧ-диапазона с тепловым источником электромагнитного шума. С его помощью рассчитаны частотная зависимость, плотность вероятности и параметры распределения результатов измерений чувствительности радиометра.

Ключевые слова: образцовый генератор, радиометр, электромагнитный шум, контроль, метрология.

V.P. Kutsenko, O.P. Yanenko

Donetsk National Technical University, State-owned Scientific-Production Enterprise "KVARISIT", National Technical University of Ukraine "KPI".

Measuring of Metrology Descriptions of Aerophare Control Devices. For metrology of radiometric devices we developed a SHF generator with a heat source of electromagnetic noise. It helped to calculate frequency dependence, probability density and parameters of radiometer sensitivity measurement results distribution. Development of highly sensitive aerophare devices of control needs in the presence of exemplary generators of noise. This question is sharply put at control of properties of technological wares due to measuring of their own radiations of low intensity in OHF-diapazone with the use of the unstandardized aerophare apparatus. One of the basic requirements, produced to it, there is measuring of these radiations intensity of which is $10^{-13} \dots 10^{-14}$ W, and registration them is a difficult enough task. For diminishing of size of error at the metrology providing of the developed aerophare devices of control with the use of method of substitution development is needed exemplary the generator of noise of OHF-diapazona with the more best descriptions what the known standard generators. The method of measuring of metrology descriptions of aerophare devices of control and treatment of results of measurings is considered in the article. Were metrology descriptions of aerophare device of control measured by the developed exemplary generator of noise with the maximal level of spectral closeness of power of noise on his output $4,5 \cdot 10^{-21}$ Wt/G, that does correspond integral power in the bar of analysable frequencies $4,5 \cdot 10^{-13}$ Wt. Frequency dependences of output signals of radiometer are taken off on a power-level entrance signal, the fluctuation threshold of his sensitiveness, which made $2 \cdot 10^{-14}$ Wt, is certain. Treatment of results of measurings is produced. Calculations rotined that an error increased with diminishing of level of entrance power, but 10% does not excel. The results of the conducted measurings are up-diffused in obedience to a normal law. With the purpose of increase of exactness of measurings of metrology descriptions of aerophare devices of control for the levels of power near the threshold of their sensitiveness it is recommended to conduct them no less than 20 times and use the computer methods of treatment of information.

Keywords: exemplary generator, radiometer, electromagnetic noise, control, metrology.