

УДК 621.317
EDN: RDHFPC

PACS: 07.57.Kp, 84.40.Az



Исследование стабильности метрологических характеристик первичных измерительных преобразователей мощности в волноводных трактах

Д. Б. Михайлов, А. В. Полянчева, А. И. Матвеев

Приводятся результаты исследований метрологических характеристик первичных измерительных преобразователей мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах, находящихся в эксплуатации более 20 лет. Показано, что при конструировании и дальнейшем использовании термисторных первичных преобразователей в составе новейших образцов измерительной техники стабильность калибровочного коэффициента сохраняется на протяжении 4 лет.

Ключевые слова: СВЧ-диапазон, волноводный тракт, эталонный измеритель мощности.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-97-102

Введение

Развитие современной радиоэлектроники характеризуется широким внедрением техники и измерительных приборов сверхвысоких частот (далее – СВЧ) во многие отрасли науки и техники. Устройства и СВЧ приборы широко применяются в радиолокации, радиоизмерительной технике, радиоастрономии, медицине и многих других направлениях науки и техники.

Михайлов Даниил Борисович¹, с.н.с.
Полянчева Анна Владимировна¹, м.н.с.
Матвеев Алексей Игоревич², инженер.
¹ ФГБУ «Главный научный метрологический центр»
Минобороны России.

Россия, 141006, Московская область, г. Мытищи,
ул. Комарова, 13.

E-mail: 32gnii@mil.ru

² ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений».

Россия, 141570, Московская область, Солнечногорский район, г.п. Менделеево.

E-mail: mtvv@vniiftri.ru

Статья поступила в редакцию 2.02.2023

После доработки 24.02.2023

Принята к публикации 4.03.2023

© Михайлов Д. Б., Полянчева А. В., Матвеев А. И.,
2023

В настоящее время в миллиметровых диапазонах длин волн для измерения мощности чаще всего применяются первичные измерительные преобразователи (далее – ПИП), основным чувствительным элементом которых являются диод, термистор или термопара [1]. Конструкция термисторных ПИП показана на рис. 1.

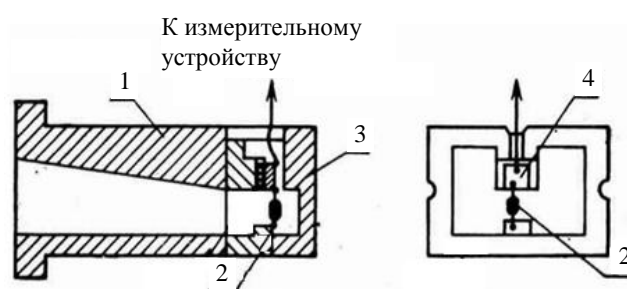


Рис. 1. Конструкция ПИП: 1 – отрезок волновода; 2 – рабочая термисторная вставка; 3 – короткозамыкатель; 4 – контакт

Преобразователь состоит из отрезка короткозамкнутого волновода, который с целью уменьшения дисперсии и волноводного сопротивления выполнен в виде плавного перехода со стандартного сечения на П-образное.

Рабочая термисторная вставка (см. рис. 1) монтируется непосредственно на конце плавного волноводного перехода. Из-за малых

размеров волновода часть рабочего тела термистора монтируется между гребнями волновода, а часто – во втулке, образуя короткозамкнутый коаксиальный отрезок. Втулка изолирована от корпуса слюдяной прокладкой, что обеспечивает включение термистора в схему индикаторного блока. На корпусе волновода, в непосредственной близости от рабочего термистора, располагается компенсационный термистор, идентичный рабочему.

Типичные характеристики термисторных преобразователей приведены в [2]. Такие преобразователи обладают высокой стабильностью во времени на интервалах более 10 лет [3].

Недостатком таких ваттметров является большое рассогласование с измерительным трактом. Однако известно, что коэффициент отражения изменяется в зависимости от установленного на термисторе сопротивления [4].

На рис. 2 приведены результаты анализа долговременной стабильности преобразователей с чувствительными элементами диод, термистор и термопара.

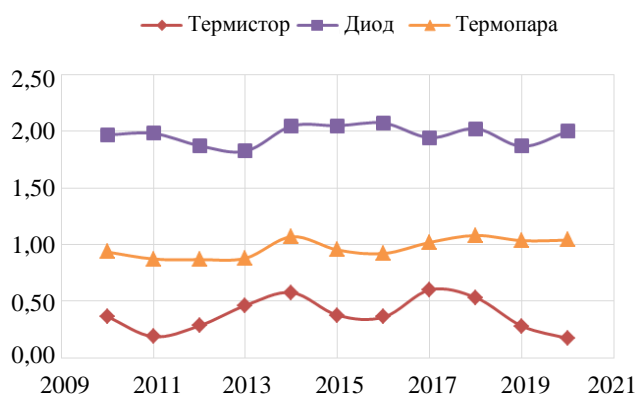


Рис. 2. Долговременная стабильность во времени чувствительных элементов (отклонение калибровочного коэффициента за год)

Долговременная стабильность термистора исходя из наблюдений за 10 летний период показывает лучший результат среди рассмотренных чувствительных элементов. Годовое отклонение диода достигает 2 %, термопары 1 %, а термистора всего 0,5 %, это в 2 раза стабильнее термопары и в 4 диода. Применение термистора как стабильного чувствительного элемента является наиболее перспективным при создании эталонных средств измерений с долговременной стабильностью

[5, 6]. Стойкость к перегрузочной мощности приведена на рис. 3.

Мощность перегрузки статического напряжения диода является наименьшей. Не соблюдение правил эксплуатации, а именно использование без заземления и антистатических покрытий, может привести к повреждению средства измерений и полному выходу из строя, что не допустимо для эталонной техники. Термопары имеют также опасность выгорания из-за статического электричества. Однако в настоящее время СВЧ-термопары отечественного производства не выпускаются. Термисторы обладают высокой стойкостью к статическим напряжениям, а мощность СВЧ, подаваемая на термистор, может достигать сотен милливольт.

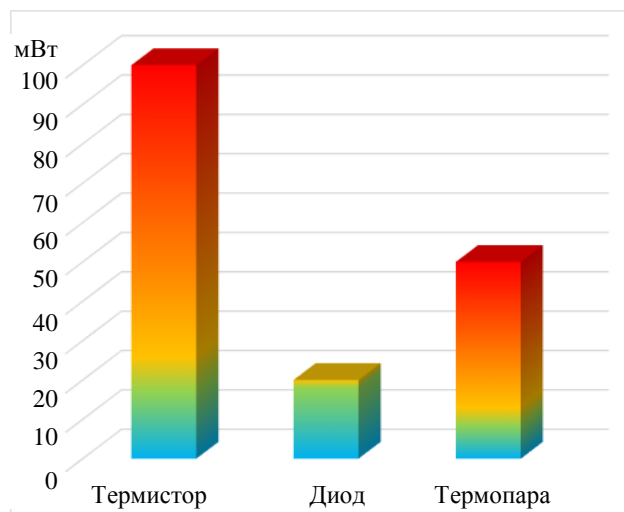


Рис. 3. Стойкость к перегрузочной мощности и статическому напряжению

Сравнительный анализ ПИП с разными типами чувствительных элементов в зависимости от количества отказов на интервалах между поверками приведен на рис. 4.

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод, что диодные средства измерений являются наиболее часто выходящими из строя. Следует отметить, что выходом из строя считается не только поломка, но и отклонение от допустимых значений, предусмотренных описанием типа или паспортом. Ваттметры термоэлектрические имеют не большой процент выхода из строя, однако наименьший показатель относится к термисторным средствам измерений [7].

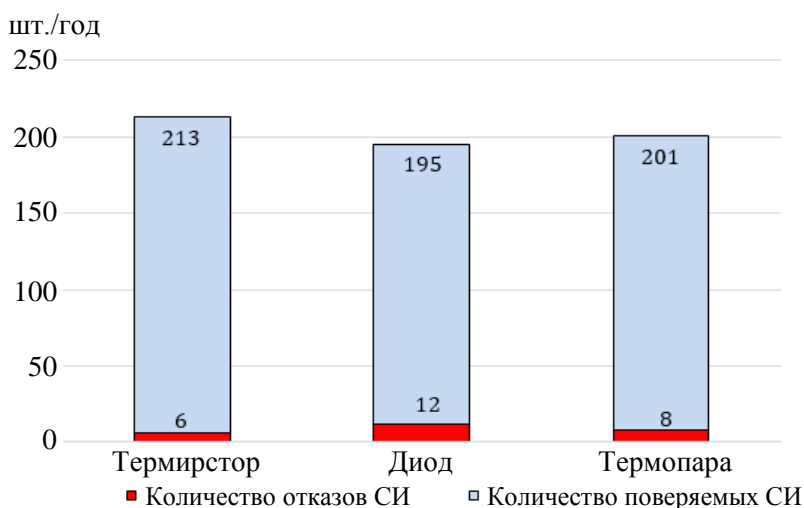


Рис. 4. Количество отказов от типа чувствительного элемента

В настоящее время для преобразователей измерительных первичных типов М5-40...М5-45, используемых в поверочных органах в качестве образцовых средств измерений 1-го и 2-го разряда, установлена периодичность поверки 1 год. Однако при назначении интервала между поверками не учитывался опыт эксплуатации ПИП в поверочных органах.

Анализ конструкции ПИП показал, что их метрологические характеристики зависят от изменения геометрических размеров волновода, размеров стыковочных отверстий, коэффициента отражения поглощающего клина, деформации фланца [8].

Анализ стабильности

Для оценки стабильности метрологических характеристик ваттметров было отобрано три группы, которые включают по пять типов ваттметров, объединенных сроком эксплуатации. В I группу входило 40 ПИП, значения $K_{эф}$ каждой из них определяли на пяти фиксированных частотах. В первую группу были включены ПИП, находившиеся в эксплуатации 40 лет, во вторую II – 32 года и в третью III – 22 года. Для всех групп находили относительные расхождения значений $K_{эф}$ между результатами, полученными в ходе первичной поверки при выпуске из производства и при последней поверке в 2022 г. Значения расхождений в процентах определяли по формуле:

$$\Delta = \frac{K_{эф1} - K_{эф2}}{K_{эф1}} \times 100, \quad (1)$$

где $K_{эф1}$ и $K_{эф2}$ – значения коэффициента эффективности, полученные соответственно при первичной и последней поверках.

Значения $K_{эф1}$ получены из паспортов на ПИП, а $K_{эф2}$ – результаты поверки этих же ПИП на вторичном эталоне единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах с погрешностями, не превышающими 1,2 % для М5-40...М5-45. Фактов забракования ПИП не было.

Полученные по формуле (1) значения расхождений для трех групп ваттметров I, II, III представлены в табл. 1 в виде максимальных Δ_{max} и средних арифметических Δ_{cp} значений расхождений по ансамблю.

Как видно из табл. 1, максимальные и средние расхождения для всех групп имеют одинаковый порядок и возрастают незначительно с увеличением срока эксплуатации ПИП. Результаты измерений на эталоне, показывают, что в большинстве случаев $K_{эф}$ ПИП не превосходит 1, а по результатам расчетов и измерений на заводе-изготовителе практически для всех ПИП даны значения, находящиеся в пределах 0,98–1,00.

В таблицах 2 и 3 представлены средние арифметические значения расхождений Δ_{cp} между группами ваттметров I, II, III в зависимости от положения ПИП в поверочной схеме и типов, по которым можно судить об изменении их метрологических характеристик во времени.

Таблица 1

Значения расхождений для групп ПИП

Тип ПИП	Положение в государственной поверочной схеме	Сечение, мм	I		II		III	
			Δ_{\max} , %	$\Delta_{\text{ср}}$, %	Δ_{\max} , %	$\Delta_{\text{ср}}$, %	Δ_{\max} , %	$\Delta_{\text{ср}}$, %
M5-40	1 р.	35×15	0,19	0,17	0,15	0,1	1,02	0,6
	2 р.		0,21	0,07	-0,55	0,3	-0,7	-0,1
	РСИ		1,76	0,41	0,97	0,55	-0,9	-0,28
M5-41	1 р.	28,5×12,6	0,2	0,3	0,4	0,52	0,35	0,16
	2 р.		0,8	0,62	0,7	0,9	0,25	-0,03
	РСИ		1,3	0,58	1,4	0,95	1,32	0,15
M5-42	1 р.	23×10	0,5	0,28	0,6	0,2	0,3	0,65
	2 р.		-0,5	-0,5	-1,0	-0,1	0,73	0,53
	РСИ		0,7	0,66	1,6	1,0	0,51	0,17
M5-43	1 р.	17×8	1,19	1,06	1,0	0,9	1,09	0,39
	2 р.		-2,8	-0,52	0,9	0,3	0,94	0,51
	РСИ		1,58	0,88	1,2	0,8	1,61	0,87
M5-44	1 р.	11×5,5	1,21	1,14	1,04	1,06	1,05	1,01
	2 р.		-1,1	-0,8	-1,1	-0,4	-1,16	-0,42
	РСИ		3,0	1,55	-1,4	0,3	1,02	0,34

Таблица 2

Значения расхождений в зависимости от положения в поверочной схеме

Положение в государственной поверочной схеме	$\Delta_{\text{ср}}$, %, для групп ПИП		
	I	II	III
1 р.	0,59	0,56	0,56
2 р.	-0,23	0,20	0,10
РСИ	0,82	0,72	0,25

Таблица 3

Значения расхождений для типов ПИП (внутри группы)

Тип ПИП	$\Delta_{\text{ср}}$, %, для групп ПИП		
	I	II	III
M5-40	0,65	0,32	0,07
M5-41	0,5	0,79	0,09
M5-42	0,15	0,37	0,45
M5-43	0,47	0,66	0,59
M5-44	0,63	0,32	0,31
Среднее	0,48	0,49	0,30

Из таблиц следует, что по типу ПИП с увеличением срока эксплуатации средние величины расхождений имеют тенденцию к возрастанию, так как на метрологические характеристики в процессе эксплуатации большое влияние оказывает состояние фланцевых со-

единений, которые более всего подвергаются изменениям.

В результате обработки полученного статистического материала по критерию согласия Пирсона [9], установлено, что закон распределения полученных случайным обра-

зом расхождений близок к нормальному закону распределения.

По полученным данным для каждой группы ПИП были рассчитаны математическое ожидание и дисперсия. Получены следующие результаты: $m_I = 0,65$, $\sigma_I = 0,922$; $m_{II} = 0,63$, $\sigma_{II} = 0,805$; $m_{III} = 0,49$, $\sigma_{III} = 0,674$. Воспользовавшись формулой

$$P = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{\Delta - m}{\sigma \sqrt{2}} \right) - \Phi \left(\frac{\Delta + m}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right], \quad (2)$$

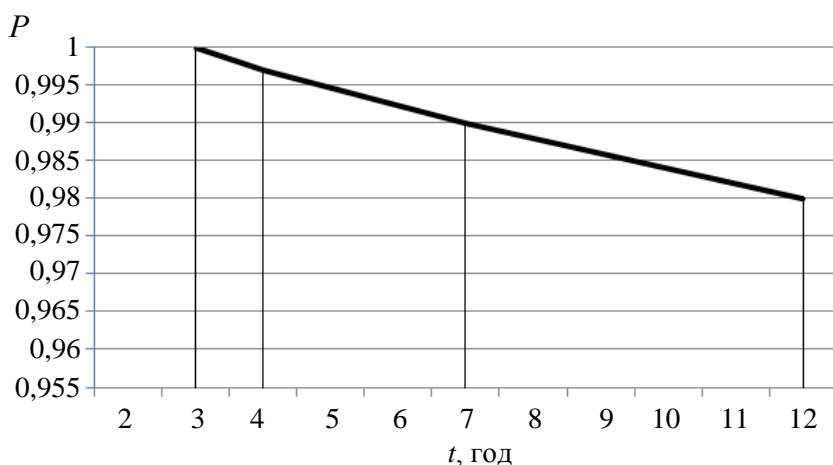


Рис. 5. Зависимость изменения вероятностей от срока эксплуатации ваттметров

получим значения вероятностей нахождения погрешностей каждой группы ваттметров в пределах $\pm 0,8\%$: $P_I = 0,9795$; $P_{II} = 0,9901$; $P_{III} = 0,9985$.

Зависимость изменения вероятностей от сроков эксплуатации ПИП, аппроксимированная по методу наименьших квадратов, имеет линейный вид (рис. 5).

Таким образом, можно определить расчетный интервал между поверками для ПИП. Так, исходя из полученных расчетов, для вероятности 0,997 интервал между поверками равен 4 года.

Заключение

Проведенные исследования дают возможность установить высокую долговременную стабильность ПИП М5-40...М5-44. Это положение возможно распространить и на другие ваттметры, схожие по своему устройству, принципу работы и техническим характеристикам, в том числе и вновь создаваемые ваттметры. Необходимо отметить явные недостатки, возникающие при использовании ПИП: малый динамический диапазон измеряемой мощности и необходимость подключения термисторного моста (для отображения результатов измерений). Тем не менее, использование данных ваттметров позволяет проводить высокоточные измерения выходной мощности источников СВЧ сигналов в процессе разработки, серийного выпуска и периодического контроля метрологических характеристик при эксплуатации и решении исследовательских задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Билько М. И., Томашевский А. К. Измерение мощности на СВЧ. – М.: Радио и связь, 1986.
2. Справочная таблица [Электронный ресурс]: <http://www.electrosad.ru/Electronics/termSpr.htm>
3. Матвеев А. И. / Метрология в XXI веке. – Менделеево, 2018. С. 207–208.
4. Клейменов Ю. А., Закутин А. А. / Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 16. С. 203–211.
5. Кагирина К. А. и др. / Микроэлектроника. 2017. Т. 46. № 3. С. 164–169.
6. Матвеев А. И. / Измерительная техника. 2022. № 1. С. 58–61.
7. Петухова Н. А., Гатчин Ю. А. / Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 2. № 11. С. 146–151.
8. Бурак И. Ф., Гусинский А. В., Шаров Г. А. Измерение мощности СВЧ в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018.
9. Венцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Физматгиз, 1976.

Stability study of metrological characteristics of primary power transducers in waveguides

D. B. Mihaylov¹, A. V. Polyancheva¹ and A. I. Matveev²

¹ General Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation
13 Komarova st., Mytishchi, Moscow Region, 141006, Russia
E-mail: 32gnii@mil.ru

² The Federal State Unitary Enterprise «Russian metrological institute of technical physics and radioengineering» (FSUE «VNIIFTRI») worker's settlement Mendeleevo, Solnechnogorsk city, Moscow region, 141570, Russia

Received 2.02.2023; revised 24.02.2023; accepted 4.03.2023

The results of studies of metrological characteristics of primary power transducers of electromagnetic oscillations in waveguides, which have been in operation for more than 20 years, are presented. It is shown that when thermistor primary transducers are designed and later used as part of the latest samples of measuring technology, the stability of the calibration coefficient is preserved for 4 years.

Keywords: Microwave band, waveguide, reference power meter.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-97-102

REFERENCES

1. Bilko M. I. and Tomashevskiy A. K., *Izmerenie moshnosti na SHF*, Moscow, Radio i svyaz, 1986.
2. Internet resource: <http://www.electrosad.ru/Electronics/termSpr.htm>
3. Matveev A. I., *Metrologia v XXI veke*, Mendeleevo, 2018, pp. 207–208.
4. Kleymenov Yu. A. and Zakutin A. A., *Vozdushno-kosmicheskie sili. Teoria i praktika*, № 16, 203–211 (2020).
5. Kagirina K. A. et al., *Microelectronika* 2017. V. 46. №. 3. P. 164-169 (2017).
6. Matveev A. I., *Izmeritel'naya tekhnika*, № 1, 58–61 (2022).
7. Petuhova N. A. and Gatchin Yu. A., *Uspеhi sovremennoy nauki i obrazovaniya* 2 (11), 146–151 (2016).
8. Burak I. F., Gusinskiy A. V. and Sharov G. A., *Izmerenie moshnosti SHF v diapazone santimetrov i millimetrov voln*, Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2018.
9. Ventcel E. S., *Teoria veroyatnostey*, Moscow, Fizmatgiz, 1976.