



УДК 53.089.6, 621.317.38
ГРНТИ 90.03.19

КОНТРОЛЬ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ВАТТМЕТРОВ ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ О СТАБИЛЬНОСТИ МОДУЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ РАССОГЛАСОВАННОГО ВАТТМЕТРА

*Ю.А. КЛЕЙМЕНОВ, доктор технических наук, старший научный сотрудник
ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации
(г. Мытищи)*
*А.А. ЗАКУТИН
ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации
(г. Мытищи)*

Рассмотрен метод контроля эффективного коэффициента отражения ваттметров проходящей мощности, базирующийся на передаче единицы мощности электромагнитных колебаний с учетом фазовых соотношений между коэффициентами отражения ваттметра проходящей и поглощаемой мощности. Его реализация связана с определением матрицы рассеяния делителей мощности в процессе выполняемых проверок. Определение эквивалентного комплексного коэффициента отражения для выхода калибратора мощности на базе резистивного делителя мощности осуществляется измерением матрицы рассеяния делителя с применением трехпортового измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения. За счет применения предлагаемого в работе метода с использованием рассогласованного ваттметра становится возможным контроль коэффициента отражения без использования измерителей комплексных коэффициентов передачи и отражения; в результате время проверки исправности радиотехнического образца сокращается более чем в 4 раза.

Ключевые слова: исправность радиотехнического образца, ваттметр, эффективный коэффициент отражения выхода, измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения, калибровочный коэффициент поглощаемой мощности и частотный коэффициент калибратора мощности ваттметра.

PASSING POWER WATTMETERS EFFECTIVE REFLECTION COEFFICIENT CONTROL BASED ON A PRIORI INFORMATION ABOUT THE MISMATCHED WATTMETER REFLECTION COEFFICIENT MODULE STABILITY

*YU.A. KLEYMENOV, Doctor of Technical sciences, Senior Researcher
Federal state budgetary institution «Main scientific metrological center» of the Ministry of defense of the Russian
Federation (Mytishchi)*
*A.A. ZAKUTIN
Federal state budgetary institution «Main scientific metrological center» of the Ministry of defense of the Russian
Federation (Mytishchi)*

A method for monitoring the of transmitted power wattmeters effective reflection coefficient, based on the transmission of a unit of power of electromagnetic vibrations, taking into account the phase relations between the reflection coefficients of the wattmeter of transmitted and absorbed power, is considered. Its implementation is related to determining the scattering matrix of power dividers in the process of performing checks. Determination of the equivalent complex reflection coefficient for the output of a power calibrator based on a resistive power divider is performed by measuring the scattering



matrix of the divider using a three-port meter of complex transmission and reflection coefficients. It becomes possible to control the reflection coefficient without using meters of complex transmission and reflection coefficients by applying the method proposed in the work using a mismatched wattmeter; as a result, the time for checking the serviceability of a radio-technical sample is reduced by more than 4 times.

Keywords: serviceability of a radio engineering sample, wattmeter, effective output reflection coefficient, meter of complex transmission and reflection coefficients, calibration coefficient of absorbed power and frequency coefficient of the wattmeter power calibrator.

Введение. Исправность образца вооружения военной и специальной техники (ВВСТ) определяется, исходя из соответствия его характеристик полному набору требований, заданных конструкторской и эксплуатационной документацией при нормативных ограничениях на условия применения.

Для принятия решения об исправности конкретного радиотехнического образца ВВСТ при его эксплуатации периодически проводится контроль технических характеристик, влияющих на его работоспособность. В свою очередь, работоспособность изделия оценивается возможностями выполнять полный перечень функциональных задач с показателями качества (эффективности), установленными требованиями технической документации.

Одной из характеристик, позволяющей судить об исправности объекта ВВСТ, является мощность электромагнитных колебаний. Для решения задач непосредственно на объектах ВВСТ применяются ваттметры сверхвысоких частот (СВЧ).

В настоящее время в Российской Федерации в различных сферах деятельности применяется более 30 типов ваттметров; общее количество ваттметров, находящихся в эксплуатации, достигает нескольких тысяч экземпляров. Диапазоны их рабочих частот лежат в пределах от 0,03 ГГц до 178,6 ГГц, а диапазон измеряемых мощностей перекрывает диапазон более 130 дБ; погрешность измерений мощности электромагнитных колебаний составляет 4...25 %.

Актуальность. Как показано в [1], в настоящее время поверка коаксиальных ваттметров, функционирующих в диапазоне рабочих частот от 0,03...18 ГГц, осуществляется с применением 6 узкополосных калибраторов мощности [2]. Привлечение значительного объема измерительных средств обусловлено отсутствием возможностей создания широкополосного делителя мощности с малым значением модуля эффективного коэффициента отражения $\dot{\Gamma}_o$ на выходе. Тактико-технические характеристики измерительного устройства непосредственно влияют на величину погрешности рассогласования при передаче мощности электромагнитных колебаний [1].

Перечень недостатков указанной схемы поверки включает в себя [1]:

необходимость механической подстройки эффективного коэффициента отражения $\dot{\Gamma}_o$ на достаточно большом множестве точек дискретизации диапазона рабочих частот и отсутствие возможности выполнения измерений в полосе частот;

значительная продолжительность процесса поверки ваттметров при отсутствии возможностей автоматизации однотипных трудоемких измерений;

существенная степень износа присоединительных разъемов поверяемых ваттметров, определяющая тенденции возрастания случайных погрешностей проводимых измерений;

высокая стоимость комплектов измерительной техники для оснащения измерительных лабораторий (комплексов) вследствие большого числа привлекаемых для контроля калибраторов.

Одним из перспективных методов передачи единицы мощности электромагнитных колебаний, позволяющим уменьшить погрешность рассогласования, является учет фазовых соотношений между коэффициентами отражения ваттметра проходящей и поглощаемой мощности [3].

Графическое представление закономерностей уменьшения погрешности рассогласования при учете фазовых соотношений между коэффициентами отражения ваттметра для проходящей



и поглощаемой мощности приведено на рисунке 1. Оно изображено в виде двумерных распределений по осям прямоугольной системы координат; погрешность рассогласования устанавливается при фиксированных значениях эквивалентного комплексного коэффициента отражения выхода калибратора и комплексного коэффициента отражения входа ваттметра поглощаемой мощности.

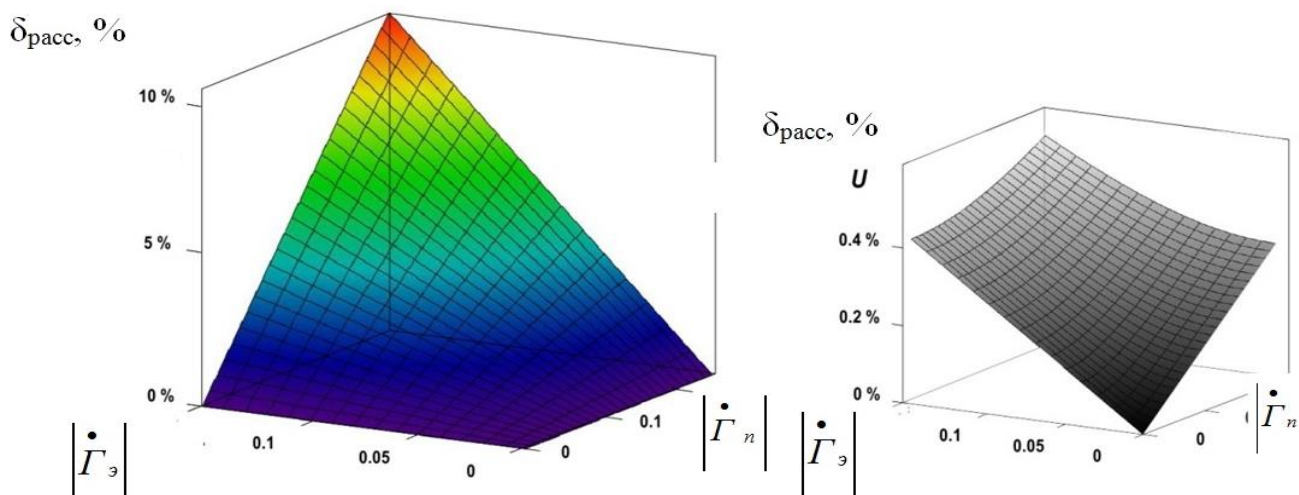


Рисунок 1 – Графическое представление уменьшения погрешности рассогласования при учете фазовых углов

Калибровочный коэффициент ваттметра поглощаемой мощности K_k и частотный коэффициент калибратора мощности α соответственно определяются выражениями [1]:

$$K_k = \frac{N_{M3}}{\alpha \cdot N_{M1}} \left(1 - 2 \left| \dot{\Gamma}_3 \right| \cdot \left| \dot{\Gamma}_n \right| \cdot \cos(\varphi_3 + \varphi_n) \right), \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{N_{M3}}{K_k \cdot N_{M1}} \left(1 - 2 \left| \dot{\Gamma}_3 \right| \cdot \left| \dot{\Gamma}_n \right| \cdot \cos(\varphi_3 + \varphi_n) \right), \quad (2)$$

где N_{M3} – показания ваттметра поглощаемой мощности, N_{M1} – показания калибратора, α – частотно зависимый коэффициент калибратора, $\dot{\Gamma}_3$ – эквивалентный комплексный коэффициент отражения выхода калибратора, $\dot{\Gamma}_n$ – комплексный коэффициент отражения входа ваттметра поглощаемой мощности, φ_3, φ_n – фазовые углы комплексных коэффициентов отражения калибратора и ваттметра поглощаемой мощности.

Как следует из рисунка 1, при возможных значениях эквивалентного комплексного коэффициента отражения выхода калибратора и комплексного коэффициента отражения входа ваттметра поглощаемой мощности погрешность рассогласования изменяется в пределах 10 %.

Для нахождения эквивалентного комплексного коэффициента отражения выхода $\dot{\Gamma}_3$ калибратора мощности, построенного с применением резистивного делителя мощности, требуется выполнить измерение элементов матрицы рассеяния делителя с применением трехпортового измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения (ККПО) [3]. Выполнение указанных измерений предполагает разборку устройства и извлечение делителя из корпуса калибратора.



Коэффициент $\dot{\Gamma}_o$, при этом определяется по измеренным параметрам матрицы рассеяния в соответствии с правилом [3]:

$$\dot{\Gamma}_o = \dot{S}_{22} - \frac{\dot{S}_{21} \dot{S}_{32}}{\dot{S}_{31}}, \quad (3)$$

где $\dot{S}_{22}, \dot{S}_{21}, \dot{S}_{32}, \dot{S}_{31}$ – параметры матрицы рассеяния делителя мощности.

Однако, несмотря на перспективность данного подхода, имеется ряд проблем существенно затрудняющих его применение. В число наиболее существенных из них входят [1]:

нарушение целостности прибора, обусловленное необходимостью извлечения делителя мощности; внесение дополнительной «фланцевой погрешности», вызванной разъединением делителя мощности и опорного ваттметра при извлечении делителя мощности из корпуса;

высокие затраты на мероприятия проверки, обусловленные высокой стоимостью трехпортовых измерителей ККПО, применяемых для измерений коэффициентов $\dot{\Gamma}_o$.

Из (1) следует, что изменение величины коэффициентов отражения $\dot{\Gamma}_o$ и $\dot{\Gamma}_n$ приводит к изменению величины K_k .

В соответствии с установленной зависимостью разработан метод, позволяющий использовать доминирующее влияние погрешности рассогласования для контроля неизменности эквивалентного комплексного коэффициента отражения выхода калибратора [1] без разборки прибора.

Проведенный в целях реализации данного подхода анализ различных конструкций первичных преобразователей ваттметров СВЧ и известных методов измерения мощности СВЧ [1, 3, 4] показал целесообразность использования болометрического метода, который положен в основу работы болометрических и термисторных ваттметров. Сущность его заключается в использовании изменения сопротивления термочувствительного элемента (болометра, термистора или терморезистора) под воздействием СВЧ мощности, превращаемой им в теплоту.

Измерение мощности СВЧ с помощью термисторных преобразователей [3] сводится к измерению изменения мощности смещения, создающей эквивалентный нагрев при сохранении неизменным сопротивления термочувствительного элемента. Для этого используются мостовые измерительные схемы, в одно из плеч которых включается термочувствительный элемент.

Простейшим измерительным блоком термисторного или болометрического ваттметра является резистивный мост Уитстона, схема которого приведена на рисунке 2.

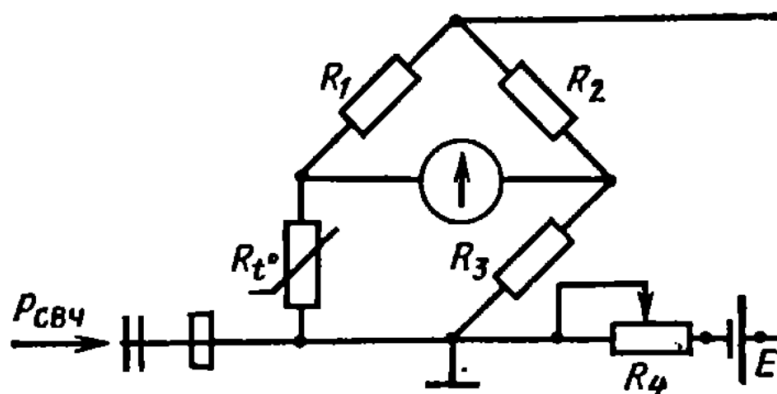


Рисунок 2 – Схема применения моста Уитстона для измерения мощности



В одно из плеч резистивного моста включено сопротивление термочувствительного элемента (например, термистора) первичного преобразователя. Термистор R_t одновременно включен в линию передачи как оконечная нагрузка. Сопротивления резисторов остальных плеч моста R_1, R_2, R_3 подбирают такими, чтобы при балансе моста термистор обладал заданным сопротивлением постоянному току. Балансируют мост с помощью сопротивления R_4 , регулируя величину тока питания моста и соответственно тепловой режим термистора.

В современных измерительных блоках баланс мостовой схемы поддерживается автоматически, а конструкция мостовой схемы обеспечивает установку произвольных значений сопротивления с шагом 1 Ом.

На рисунке 3 приведена функциональная схема, поясняющая принцип действия самобалансирующегося моста с возможностью произвольной установки сопротивления.

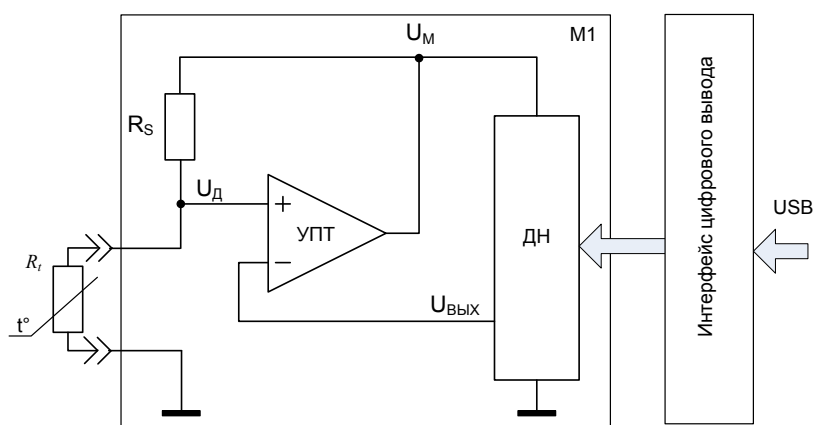


Рисунок 3 – Схема самобалансирующегося моста с возможностью произвольной установки сопротивления

Каждый мост содержит резистивную цепь, включающую в себя последовательное сопротивление R_s и сопротивление термистора R_t . Со средней точки цепи напряжение U_d подается на неинвертирующий вход интегрирующего усилителя постоянного тока с выходным током, обеспечивающим необходимый диапазон значений мощности подогрева термистора. Напряжение с выхода усилителя U_M подается на верхнюю точку резистивной цепи и на вход управляемого делителя напряжения. Выходное напряжение делителя $U_{ВЫХ}$ подается на инвертирующий вход усилителя. Резистивная цепь совместно с делителем напряжения образуют мостовую схему, условием баланса которой является равенство U_d и $U_{ВЫХ}$. Отсюда следует выражение, связывающее коэффициент передачи делителя K_d с сопротивлением термистора, которое автоматически поддерживается мостом

$$R_t = \frac{K_d \cdot R_s}{1 - K_d} \quad (4)$$

Делители напряжения управляются двоичным цифровым кодом, поступающим с интерфейса цифрового ввода-вывода. Разрядность управляющего двоичного кода выбирается исходя из требуемого разрешения моста по сопротивлению.

На рисунке 4 приведена зависимость поддерживаемого сопротивления термистора от цифрового управляющего кода на примере 8-разрядного делителя напряжения, представленного в десятичном виде. Согласно зависимости, приведенной на рисунке 4, при изменении управляющего кода делителя напряжения в пределах от 80 до 160 сопротивление термистора возрастает с 200 Ом до 700 Ом. Дальнейшее увеличение управляющего кода делителя напряжения до 200 сопровождается повышением сопротивления термистора до 1500 Ом.

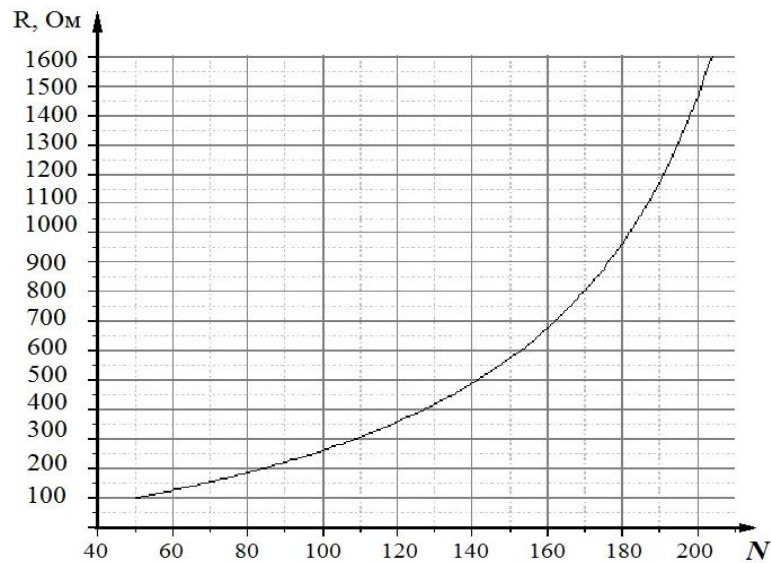


Рисунок 4 – Зависимость сопротивления термистора от управляющего кода делителя напряжения

Как правило, рабочее сопротивление коаксиальных преобразователей лежит в пределах от 50 до 200 Ом, а рабочее сопротивление волноводных преобразователей составляет 20–400 Ом. Сопротивление термистора на постоянном токе может существенно отличаться от полного сопротивления на СВЧ, особенно на частотах свыше 5–7 ГГц. Поэтому для достижения согласования рабочего сопротивления термистора необходимо устанавливать его значение, отличающееся от характеристического сопротивления линии передачи.

Используя это свойство термисторных преобразователей можно создать режим работы, при котором вход преобразователя будет рассогласован и иметь значение коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) более 2 в широком диапазоне частот. Зависимости КСВН входа коаксиального термисторного преобразователя 8478b при различных значениях рабочего сопротивления термистора приведены на рисунке 5.

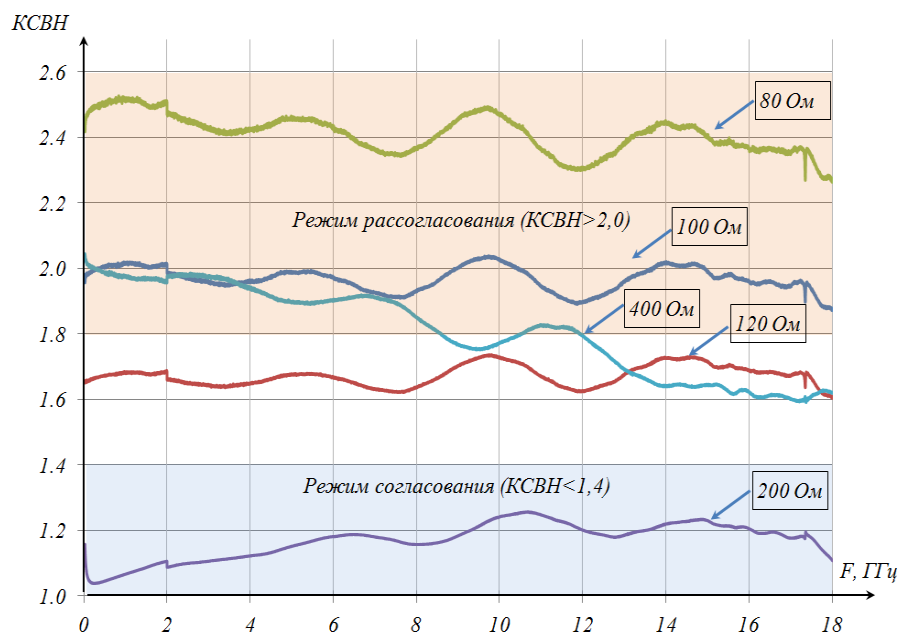


Рисунок 5 – Зависимость КСВН входа коаксиального термисторного преобразователя 8478b при различных значениях рабочего сопротивления термистора



Значение модуля $\dot{\Gamma}_3$ коаксиальных делителей мощности, пригодных для создания калибраторов мощности в диапазоне частот 0,03–18 ГГц, составляет от 0,02 до 0,09, при этом погрешность определения этих значений не превышает величины 0,01 [5].

Исходя из установленной величины погрешности определения модуля $\dot{\Gamma}_3$, критерием непригодности ваттметра к дальнейшему применению может быть принято изменение модуля $\dot{\Gamma}_3$ за интервал между поверками на величину более 0,01.

Реализация предложенного метода заключается в измерении отношения мощностей калибратора мощности и рассогласованного ваттметра при первичной (полной) поверке, когда проводится разборка калибратора для измерения матрицы рассеяния делителя мощности в целях расчета $\dot{\Gamma}_3$.

В дальнейшем, при периодической поверке, разборка калибратора и измерение $\dot{\Gamma}_3$ не проводятся. Определяется только отношение мощностей с применением того же рассогласованного ваттметра. Контроль неизменности комплексного коэффициента отражения проводится непосредственно перед измерениями с применением эталона первого разряда [5].

На основе определенного при первичной поверке отношения мощностей калибратора и рассогласованного ваттметра при периодической поверке контролируется его изменение (в процентах) по формуле [1, 5].

$$\Delta\alpha_{\text{расс}} = \frac{\alpha_{\text{перв}} - \alpha_{\text{период}}}{\alpha_{\text{период}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{перв}}$ – значение α , определенное с применением рассогласованного ваттметра при первичной поверке; $\alpha_{\text{период}}$ – значение α , определенное с применением рассогласованного ваттметра при периодической поверке.

Можно показать, что изменение модуля $\dot{\Gamma}_3$ на величину более 0,01 при значении КСВН входа рассогласованного ваттметра более 1,8 приведет к изменению $\Delta\alpha_{\text{расс}}$ на величину 0,7 %. Отклонение α в таких границах легко идентифицируется на фоне случайной погрешности, не превышающей 0,1–0,15 %. В свою очередь, это позволит принять решение о соответствии (несоответствии) калибратора установленным требованиям.

В качестве технических средств для реализации предложенного метода могут быть использованы термисторные преобразователи мощности типов М5-89 или 8478b. При изменении сопротивления блока мостов выше или ниже номинального, КСВН входа преобразователя изменяется в пределах от 1 до 3. Путем экспериментального подбора сопротивления для различных частот может быть составлена табличная зависимость, которая учитывается при проведении измерений.

Апробация данного метода выполнялась в период 2015–2017 годов для группы из трех калибраторов мощности, построенных с применением резистивных делителей мощности №№ 1–3 из состава ваттметров МЗ-1810К (заводские №№ 12–15).

Результаты определения изменения коэффициента $\Delta\alpha_{\text{расс}}$ представлены: за интервал между измерениями 2015–2016 годов – на рисунке 6; за интервал между измерениями 2016–2017 годов – на рисунке 7. Как видно из приведенных зависимостей, изменение $\Delta\alpha_{\text{расс}}$ для трех различных делителей мощности не превысило значения 0,7 %. Данный факт свидетельствует о неизменности $\dot{\Gamma}_3$ и их соответствии установленным требованиям.

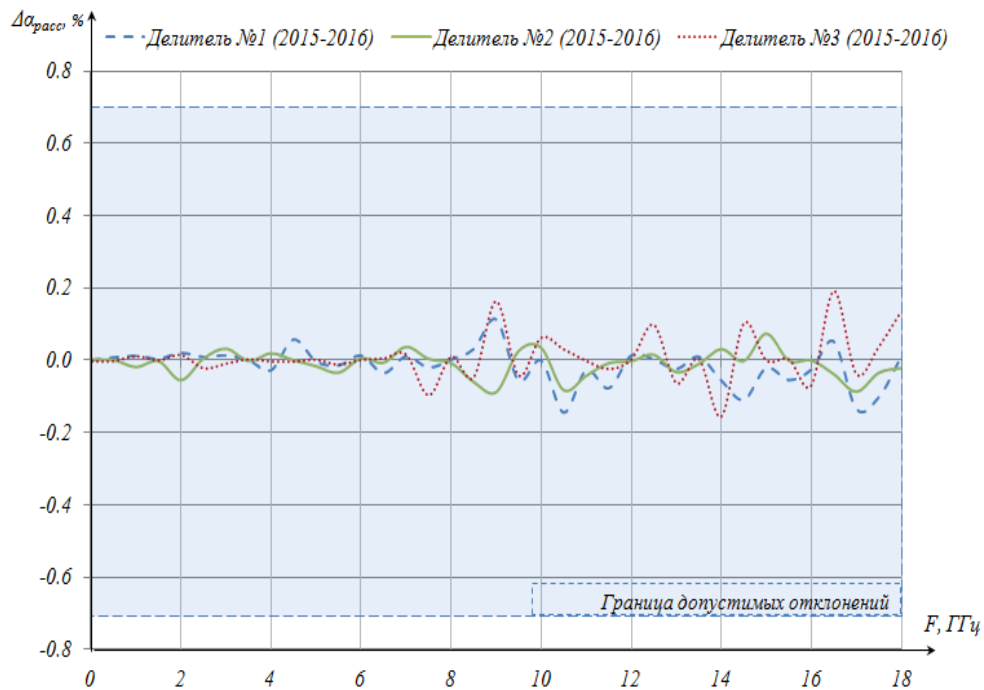


Рисунок 6 – Изменение коэффициента $\Delta\alpha_{racc}$ за интервал между измерениями 2015...2016 годов

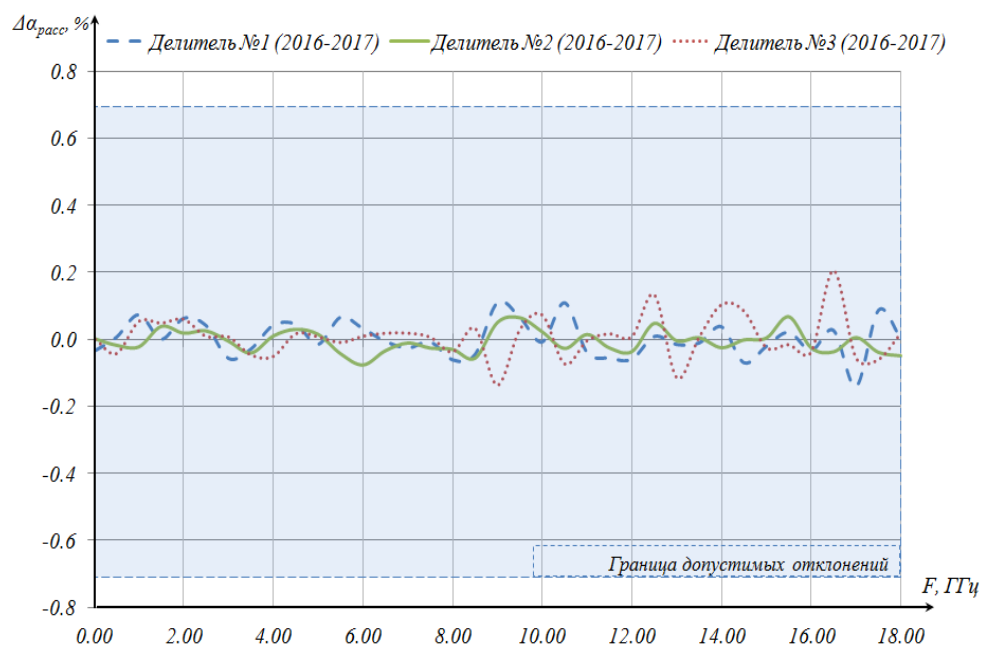


Рисунок 7 – Изменение коэффициента $\Delta\alpha_{racc}$ за интервал между измерениями 2016...2017 годов

Выводы. Разработан метод контроля эффективного коэффициента отражения ваттметров проходящей мощности, базирующийся на учете фазовых соотношений между коэффициентами отражения ваттметра проходящей и поглощаемой мощности электромагнитных колебаний. Он реализуется на основе экспериментального определения коэффициентов матрицы рассеяния для делителей мощности с использованием рассогласованного ваттметра. Определение эквивалентного комплексного коэффициента отражения для выхода калибратора мощности на базе резистивного делителя мощности осуществляется измерением матрицы рассеяния делителя с применением трехпортового измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения.



За счет применения разработанного метода измерений обеспечивается контроль коэффициента отражения без привлечения набора измерителей комплексных коэффициентов передачи и отражения, что исключает необходимость использования дорогостоящих измерителей ККПО. В результате контроля коэффициента отражения с применением рассогласованного ваттметра при поверке калибраторов мощности без их разборки время поверки исправности радиотехнического образца ВВСТ сокращается более чем в 4 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закутин А.А. Методика комплектной проверки комплексного эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходящей мощности // Научное обозрение. 2019. № 1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.srjournal.ru/2019/id151> (дата обращения 15.11.2020).
2. ГОСТ 8.569-2000. ГСИ. Ваттметры СВЧ малой мощности диапазона частот 0,02-178,6 ГГц. Методика поверки и калибровки. М.: Издательство стандартов, 2001. 11 с.
3. Голуб Д.Н., Закутин А.А. Совершенствование метода передачи размера единицы мощности электромагнитных колебаний рабочим эталонам 1-го разряда // Измерительная техника. 2009. № 5. 72 с.
4. Билько М.И., Томашевский А.К. Измерение мощности на СВЧ / М.: Радио и связь, 1986. 168 с.
5. Закутин А.А., Голуб Д.Н. Количественная оценка остаточной погрешности рассогласования за счет учета фазовых соотношений между поверяемым ваттметром СВЧ и калибратором мощности // Материалы XXXVII научно-технической конференции молодых учёных и специалистов военных метрологов «Актуальные задачи военной метрологии», ФГКУ «ГНМЦ» Минобороны России, 2012. 207 с.

REFERENCES

1. Zakutin A.A. Metodika komplektnoj proverki kompleksnogo `effektivnogo ko`efficienta otrazheniya vyhoda vattmetrov prohodyaschej moschnosti // Nauchnoe obozrenie. 2019. № 1. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.srjournal.ru/2019/id151> (data obrascheniya 15.11.2020).
2. GOST 8.569-2000. GSI. Vattmetry SVCh maloj moschnosti diapazona chastot 0,02-178,6 GGc. Metodika poverki i kalibrovki. M.: Izdatel'stvo standartov, 2001. 11 p.
3. Golub D.N., Zakutin A.A. Sovershenstvovanie metoda peredachi razmera edinicy moschnosti `elektromagnitnyh kolebanij rabochim `etalonam 1-go razryada // Izmeritel'naya tehnika. 2009. № 5. 72 p.
4. Bil'ko M.I., Tomashevskij A.K. Izmerenie moschnosti na SVCh / M.: Radio i svyaz', 1986. 168 p.
5. Zakutin A.A., Golub D.N. Kolichestvennaya ocenka ostatochnoj pogreshnosti rassoglasovaniya za schet ucheta fazovyh sootnoshenij mezhdu poveryaemym vattmetrom SVCh i kalibratorom moschnosti // Materialy XXXVII nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchenyh i specialistov voennyh metrologov «Aktual'nye zadachi voennoj metrologii», FGKU «GNMC» Minoborony Rossii, 2012. 207 p.

© Клейменов Ю.А., Закутин А.А., 2020

Клейменов Юрий Анатольевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника (по научной работе), ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации, Россия, 141006, г. Мытищи, ул. Комарова, 13, ura19572006@yandex.ru.

Закутин Александр Александрович, начальник лаборатории, ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации, Россия, 141006, г. Мытищи, ул. Комарова, 13, zakutin_32@mail.ru.