<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-15-20>

УДК 621.372.22

Оценка рассогласования передающей линии при температурном воздействии

В. С. Лячин

Северо-Западный региональный центр концерна ВКО «Алмаз – Антей»,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Акционерное общество «Завод радиотехнического оборудования», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье представлена методика и результаты оценивания рассогласования передающей линии при проведении измерений частотно-зависимых параметров радиоэлектронной аппаратуры комплексов и систем военного назначения в условиях климатических испытаний.

Ключевые слова: неопределенность измерения, температурная неоднородность, рассогласование, передающие линии

Для цитирования: Лячин В. С. Оценка рассогласования передающей линии при температурном воздействии // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 2. С. 15–20. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-15-20>

For citation: Lyachin V. S. Estimating transmission line mismatch under thermal exposure conditions // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 2. P. 15–20. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-15-20>

Поступила 20.01.2021 Отрецензирована 05.02.2021 Одобрена 20.02.2021 Опубликована 18.06.2021

1. Введение

Современные возрастающие требования к образцам вооружения и военной техники диктуют производителям необходимость совершенствования всего цикла разработки, производства и испытаний изделий. Расширяющаяся география использования военной техники определяет важность переосмысления подходов к климатическим испытаниям электронной аппаратуры комплексов и систем военного назначения. На этом этапе немаловажно и метрологическое обеспечение, в том числе установление неопределенности измерения параметров электронной аппаратуры в условиях климатических испытаний, что позволяет избежать ложной приемки или ложной отбраковки продукции [1]. Целью исследований, изложенных в рамках данной статьи, является установление закономерностей влияния температурной неоднородности среды,

возникающей из-за зонирования области проведения испытаний, на степень рассогласования измерительной линии.

Передающие линии испытательного стенда при измерении частотно-зависимых параметров испытываемой аппаратуры вносят свой вклад в погрешность и неопределенность результатов измерений. При рассмотрении и анализе систем передач, работающих по кабелю, за направляющую систему, как правило, принимают модель однородной линии. В реальных условиях соединительная линия может иметь неоднородности, что влияет на передаваемый полезный сигнал. Подобные неоднородности, отражающие часть полезного сигнала, могут описываться коэффициентами отражения (Γ). Их влияние на результаты измерений пропорционально числу элементов измерительной схемы, а также зависит от ряда внешних воздействующих факторов [2].

В данной статье приведена методика оценивания рассогласования передающих линий

для оценочных измерений, которые являются первым этапом современного измерительного процесса. Во время оценочных измерений грубо определяются некоторые характеристики исследуемого устройства, а также измерительной схемы, для дальнейшей оптимизации измерения. Это позволяет сэкономить время, а также избежать ошибок и неверных результатов [3].

2. Оценка рассогласования

Для оценки рассогласования передающей линии были выполнены измерения по схеме, представленной на рисунке 1.

Измерения проводились в два этапа. На первом в камере устанавливались нормальные климатические условия (НКУ).

Рис. 1. Функциональная схема установки для измерения параметров передающей линии

Исследуемый СВЧ-кабель, нагруженный на согласованную нагрузку и подключенный к векторному анализатору цепей, был пропущен транзитом через климатическую камеру. Местами прохождения кабеля сквозь стенку камеры являлись шлюзы с эластичными термозаглушками. При такой схеме температурное воздействие влияет только на кабель, не затрагивая параметры нагрузки. Векторный анализатор калибровался; данные о величинах коэффициента стоячей волны (КСВ), а также о полном импедансе цепи фиксировались. Так как в этот момент система максимально согласована, то коэффициент отражения от нагрузки принимался равным Γ_0 . Показания векторного анализатора цепей отображены на рисунке 2.

На втором этапе температура в климатической камере опускалась до требуемой и кабель выдерживался в течение времени, необходимого для установления постоянной температуры по всей его длине. В рамках выполненных исследований длительность переходных процессов определялась экспериментально на основе статистической стабильности и повторяемости результатов измерений.

На рисунке 3 можно выделить отличия характеристик передающей линии с температурным переходом от линии, находящейся в НКУ. Маркер КСВ, установленный на фиксированной частоте, переместился от пучности к узлу, что означает изменение её фазы. Значение КСВ выросло с $U_1 = 1,0262$ до $U_2 = 1,1152$. Импеданс, представленный на круговой диаграмме Вольперта – Смита, также изменился. Вещественная часть уменьшилась

Рис. 2. Параметры КСВ и импеданса в НКУ

с $\Omega_1 = 51,289$ Ом до $\Omega_2 = 50,595$ Ом, а мнимая – перешла из емкостной половины круговой диаграммы при $-j230,39$ мОм в индуктивную при $j5,4551$ Ом. Это объясняется тем, что характеристики той части кабеля, которая находится в камере, изменились.

Совокупность всех изменений можно выразить через дополнительный коэффициент отражения Γ , который является эквивалентом всех отражающих неоднородностей, возникающих на участках измерительной линии, находящейся внутри камеры. Из вышеуказанных величин можно вычислить Γ_0 , а также $\Gamma_{\text{общ}} = f\{\Gamma_0, \Gamma_i\}$ [4]:

$$\Gamma_0 = \sqrt{\frac{(50-51,289)^2 + (j0,23039)^2}{(50+51,289)^2 + (j0,23039)^2}} = 0,0129, \quad (1)$$

$$\Gamma_{\text{общ}} = \sqrt{\frac{(50-50,595)^2 + (j5,455)^2}{(50+50,595)^2 + (j5,455)^2}} = 0,0544. \quad (2)$$

Известно, что для единичного коэффициента отражения коэффициент передачи $K_n = 1 - \Gamma$. По формуле 8 из [5] коэффициент затухания системы $a_{\text{зс}} = \prod_{i=1}^n (1/(1 - \Gamma_i))$, откуда следует, что $a_{\text{зс}} = \prod_{i=1}^n (1/(K_n))$. Так как коэффициент затухания – величина обратная коэффициенту передачи, получаем, что коэффициент передачи системы неоднородностей $K_{\text{нс}} = \prod_{i=1}^n (1 - \Gamma_i)$ [5]. Исходя из этого, если в линии передачи присутствует несколько последовательных коэффициентов отражения и известно лишь их результирующее значение ($\Gamma_{\text{общ}}$), то предлагается рассматривать его как:

$$\Gamma_{\text{общ}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \Gamma_i). \quad (3)$$

Используя формулу (3), можно представить $\Gamma_{\text{общ}} = 1 - (1 - \Gamma_0) (1 - \Gamma_i)$ и вычислить $\Gamma_i = 0,042$.

Коэффициент отражения Γ_i зависит от протяженности части передающей линии, подверженной воздействию температурной неоднородности. В таблице 1 представлены результаты измерений импеданса кабеля с волноводной нагрузкой, которые демонстрируют ухудшение параметров передачи при увеличении длины кабеля, находящегося в камере.

Представленные результаты получены на кабельных сборках Huber + Suchner моделей Sucotest 18RF и Sucotest 18 Armored и векторном анализаторе Rohde&Schwarz ZVA24. Стоит отметить, что неоднократные измерения также показали увеличение эффекта рассогласования на армированных кабельных сборках, предназначенных для сложных условий эксплуатации и имеющих дополнительные защитные слои для повышения их прочности и помехоустойчивости. Это происходит из-за того, что диаметр диэлектрических слоев данных кабелей превышает диаметр стандартных кабельных сборок более чем в два раза. Из-за этого изменение их погонных размеров под воздействием температуры происходит сильнее, а следовательно, и изменение импеданса более значительно. Отличие значений параметров линии до температурного воздействия и после восстановления нормальной температуры составляет не более 5 %. Достоверность представленных выводов подтверждается повторяемостью результатов, полученной в серии экспериментов.

Рис. 3. Параметры КСВ и импеданса при пониженной температуре среды

Таблица 1

Результаты экспериментального исследования импеданса кабеля

Параметры передающей линии	Измерение в НКУ	Измерение при -50°C
	1/5 длины кабеля в климатической камере	
КСВ	1,002	1,077
Импеданс	997,96 мОм $-j548,70$ мкОм	935,50 мОм $+j32,76$ мОм
LC-параметр	32 нФ	576 фГн
	4/5 длины кабеля в климатической камере	
КСВ	1,015	1,247
Импеданс	997,33 мОм $+j15,16$ мОм	881,45 мОм $+j170,96$ мОм
LC-параметр	266 пГн	3 пГн

3. Практический эффект

Значение коэффициента отражения, возникающего в коаксиальном кабеле при значительном температурном переходе, рассчитанное в данной статье, по своей величине находится в том же порядке, что и коэффициенты отражения входных и выходных разъемов измерительных приборов. Следовательно, параметр Γ_i также

необходимо учитывать при измерениях, проводящихся в климатических камерах со сквозными линиями передачи.

Практический эффект можно рассмотреть при расчете неопределенности измерения коэффициента передачи ИУ.

По схеме, представленной на рисунке 4, неопределенность измерения коэффициента передачи δG в НКУ равна [2, 6]:

$$\delta G = 20\sqrt{(\lg(1 - \Gamma_s \Gamma_a))^2 + (\lg(1 - \Gamma_s \Gamma_{A1}))^2 + (\lg(1 - \Gamma_{A2} \Gamma_a))^2}. \quad (4)$$

Первое слагаемое под корнем в формуле (4) отвечает за согласование при калибровке, два других – за согласование при измерении. Так как при воздействии температуры на участки линии передачи, находящиеся в камере (на рисунке 4 выделены синим цветом), параметры передачи становятся отличными от калибровочных, то можно выразить эти изменения через дополнительные коэффициенты

отражения $\Gamma_{\Omega 1}$ и $\Gamma_{\Omega 2}$. Для расчета обновленной неопределенности по формуле (4) Γ_{A1} заменяется на $\Gamma_{a1} = 1 - (1 - \Gamma_{A1})(1 - \Gamma_{\Omega 1})$ и Γ_{A2} – на $\Gamma_{a2} = 1 - (1 - \Gamma_{A2})(1 - \Gamma_{\Omega 2})$ по формуле (3). При $\Gamma_{A1} = \Gamma_{A2} = 0,11$ $\delta G = 0,24$. В то же время при появлении $\Gamma_{\Omega 1} = \Gamma_{\Omega 2} = 0,042$ $\delta G = 0,29$. Наблюдается увеличение неопределенности измерения на 20 %.

Для понимания важности изменения неопределенности можно рассмотреть следующий пример. Если ИУ должно иметь коэффициент усиления не менее 3дБ, а точность измерения составляет $\pm 0,24$ дБ, то только изделие с коэффициентом передачи 3,24 дБ или выше может быть принято по результатам испытаний. С другой стороны, если точность будет $\pm 0,29$ дБ, то порог коэффициента передачи для приемки повысится до 3,29 дБ, что при прочих равных увеличит количество отбраковываемых изделий. Более подробно вопрос установки приемочного интервала, полей допуска и защитной полосы рассмотрен в [1].

Общие правила и пути уменьшения рассогласования при измерениях указаны в [7]. Однако в случае линий передачи, проходящих

Рис. 4. Схема измерения коэффициента передачи испытываемого устройства (ИУ) в климатической камере

через температурные неоднородности, следует также рассмотреть следующие варианты:

а) калибровка с охлажденными кабелями. Довольно сложно осуществимый на практике путь, по причине необходимости помещения калибровочных нагрузок в климатическую камеру (где под воздействием температуры их импеданс изменится), а также манипуляций с замерзшими кабелями, которые при пониженной температуре становятся хрупкими и подверженными повреждениям;

б) использование шлюзов. Создание отдельных шлюзов или трасс с подогревом для передающих линий для уменьшения длины кабеля, подвергающегося пониженной температуре;

в) опираясь на результаты экспериментальных измерений, следует учитывать тот факт, что усиленные кабельные сборки, в том числе армированные и помехозащищенные, более подвержены эффекту рассогласования при значительном температурном переходе. Следовательно, их использование должно быть обоснованным, а при отсутствии значительных помех или механических воздействий на передающие линии их необходимо заменять на стандартные высокочастотные кабели.

Также следует отметить, что в [3] представлены различные методы коррекции рассогласования схемы (например, измерения во временной области), однако эти методики имеют ряд ограничений и представлены лишь в некоторых моделях измерителей, не реализующих многие виды измерений (например, измерение коэффициента шума Y-методом, измерение спектральной плотности фазового и амплитудного шума).

Перед проведением измерений ИУ предлагается проводить оценивание используемых кабелей по схеме, представленной на рисунке 1. Длина части кабеля, находящегося в климатической камере, при этом должна соответствовать длине части кабеля, который будет расположен в камере при измерении

параметров ИУ. В таком случае будет получена возможность заранее оценить степень рассогласования выбранной передающей линии при заданном значении испытательной температуры, после чего использовать эти данные при расчете неопределенности измерений.

Список литературы

1. Оценивание данных измерений – Роль неопределенности измерений при оценке соответствия // Объединенный комитет по руководствам в метрологии. 2012. URL: http://www.coomet.org/DB/isapi/cmt_docs/2017/12/7HHG12.pdf (дата обращения 15.11.2020).
2. Скалярный анализ цепей с помощью измерителей мощности серии U2000 с шиной USB // Keysight Technologies Inc. 2011. URL: <https://kt-spegroup.ru/articles/skalyarnyy-analiz-tsepey-s-pomoshchyu-izmeriteley-moshchnosti-serii-u2000-s-shinoy-usb/> (дата обращения 15.11.2020).
3. Дансмор Дж. П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. 736 с.
4. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1980. 152 с.
5. Тишков П. В. Влияние неоднородностей на характеристики абонентской линии // Доклады БГУИР. 2008. № 1. С. 29–37.
6. Noise figure measurement accuracy: The Y-factor method// Keysight Technologies Inc. 2019. URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-06829/application-notes/5952-3706.pdf> (дата обращения 15.11.2020).
7. Как минимизировать погрешности измерений и оценить погрешность, вызванную рассогласованием // Keysight Technologies Inc. 2014. URL: <https://spegroup.ru/wiki/kak-minimizirovat-pogreshnosti-izmereniy-i-otsenit-pogreshnost-vyzvannuyu-rassoglasovaniem.html> (дата обращения 15.11.2020).

Об авторе

Лячин Виктор Сергеевич – аспирант НОЦ Северо-Западный региональный центр концерна ВКО «Алмаз-Антей»; инженер-электроник Акционерного общества «Завод радиотехнического оборудования», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Область научных интересов: испытания вооружений и военной техники, комплексов и систем военного назначения.

Estimating transmission line mismatch under thermal exposure conditions

Lyachin V. S.

North-Western Regional Centre of the “Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation

“Zavod RTO” JSC, St. Petersburg, Russian Federation

The paper introduces a methodology for and the results of estimating transmission line mismatch when carrying out measurements of frequency-dependent parameters of radio and electronic equipment of military-purpose complexes and systems under climatic testing conditions.

Keywords: measurement uncertainty, temperature non-uniformity, mismatch, transmission lines

Information about the author

Lyachin Viktor Sergeyevich – Post-graduate student, Science and Education Centre, North-Western Regional Centre of the “Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation; Electronic Engineer, “Zavod RTO” JSC, St. Petersburg, Russian Federation.

Science research interests: testing of weapons and military equipment, military-purpose complexes and systems.