



# ОБЗОР ПРОЦЕДУР ПО УСТРАНЕНИЮ ПОБОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

**Laurent Van Rysselberghe**, R&D Project Manager, AESA S.A.;

**Wolfgang Klein**, Head of the System Development Department, AESA S.A.;

**Dick Gigon**, Telecom Test Equipment Lab Supervisor, AESA S.A.;

**Boris Dardel**, PhD in Physics, Product Development Manager, AESA S.A.;

**V. Arbet-Engels**, PhD in Engineering, CEO/Managing Director, AESA S.A.

**Лоран ван Рейссельберге**, руководитель проекта по развитию и разработкам, AESA S.A.;

**Вольфганг Кляйн**, руководитель отдела системных разработок, AESA S.A.;

**Дик Гигон**, зав. лабораторией оборудования для испытания кабелей связи, AESA S.A.;

**Борис Дардел**, канд. физ.-мат. наук, руководитель отдела НИОКР, AESA S.A.;

**В. Арбет-Энгельс**, канд. техн. наук, главный исполнительный директор, AESA S.A.

**Аннотация.** С развитием линий связи с мультигигабитной скоростью обмена данными, необходимой чтобы поддерживать сверхвысокую пропускную способность для функционирования Интернета вещей (IoT), первостепенное значение приобретают электрические характеристики кабелей. Такие кабели должны соответствовать международным стандартам, в которых не только установлены предельные значения радиочастотных (РЧ) параметров, но и определены процедуры измерений.

Эти измерения можно выполнять либо в частотной, либо во временной области. Используя преобразование Фурье, можно переходить от одного вида представления результатов к другому.

Тем не менее, одна из главных трудностей заключается в том, что для получения истинных характеристик необходимо изолировать испытываемый объект, в нашем случае кабель, от остальных приборов, которые могут оказывать воздействие на результат измерения. В действительности, испытываемый объект подключен к автоматическому измерительному устройству (АИУ) посредством интерфейсов, имеющих свои собственные частотные характеристики, которые необходимо отсечь от испытываемого объекта. Помимо этого, на высоких частотах измерение становится весьма чувствительным к тому, как оператор подключил испытываемый объект к измерительному устройству, начинают сказываться побочные эффекты, которые напрямую влияют на точность и/или погрешность (повторяемость и/или воспроизводимость) измерений.

**Ключевые слова:** линии связи, импеданс, возвратные потери, векторный анализатор цепей, кабель передачи данных, S-параметры,  $S_{11}$  – отношение мощности отражённого сигнала к мощности падающего сигнала.

**Abstract.** With the advance of multigigabit data rate communications needed to sustain the ultra-high bandwidth of Internet of things (IoT), the electrical characterization of cables is becoming paramount. These cables must comply with international standards that not only set RF parameter limits but also define measurement procedures.

These measurements can be done either in the frequency or time domain. Using Fourier transformation allows converting from one representation to the other.

Nevertheless, one of the main challenges is to isolate the DUT (Device Under Test), the cable in our case, from the rest of the measurement environment in order to get its intrinsic characteristics.



As a matter of fact, the DUT is connected to the ATE (Automatic Test Equipment) via interfaces with their own frequency response that must be removed from the DUT itself. Additionally, at high frequency, the measurement is becoming extremely sensitive to the way the operator is connecting the DUT on the ATE, with parasitic effects that directly impact the accuracy and/or precision of the measurement (repeatability/reproducibility).

**Key words:** transmission lines, impedance, return loss, vector network analyzer, data cable, S-parameters,  $S_{11}$  – the ratio of the reflected voltage wave to the incident voltage wave.

*Материал поступил в редакцию 27.01.2021  
E-mail: info@tdvniikp.ru,  
aesa@aesa-cortailod.com*

### ВВЕДЕНИЕ

Учитывая большое число параметров, которые предстоит измерить и вычислить, характеристики кабеля передачи данных определяются с использованием автоматического измерительного устройства (АИУ). Однако полученные данные сильно зависят от испытательной установки, калибровки, подготовки объекта к испытанию и других побочных эффектов. Поэтому, чтобы выделить истинное значение возвратных потерь и/или импеданса, присущих испытываемому объекту, необходимо внести ряд поправок, руководствуясь базовыми теоретическими принципами.

В данной статье даётся обзор различных процедур внесения поправок с целью устранения влияния оператора при подготовке кабеля к испытанию, а также устранения эффектов рассогласования при подключении кабеля. В разделах 1 и 2 кратко рассмотрены теория передачи сигнала по линиям связи и принцип измерения. В разделах 3 и 4 описываются процедуры внесения поправок в частотной и временной областях и рассмотрены их преимущества и недостатки. В разделе 5 описывается деэмбединг (de-embedding), как

способ устранения помех, вносимых тестовой оснасткой для испытания кабеля, математическим методом.

### 1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Для начала стоит вспомнить основы теории передачи сигналов по линиям связи, чтобы понять всю сложность интерпретации данных [1].

Характеристический импеданс линии передачи (в данном случае, кабеля) как функция первичных параметров выражается следующим образом:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1)$$

Аналогично комплексная постоянная распространения вычисляется по следующей формуле:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L) \times (G + j\omega C)} \quad (2)$$

где действительная часть  $\alpha$  и мнимая часть  $\beta$  – это соответственно затухание и фазовая постоянная.

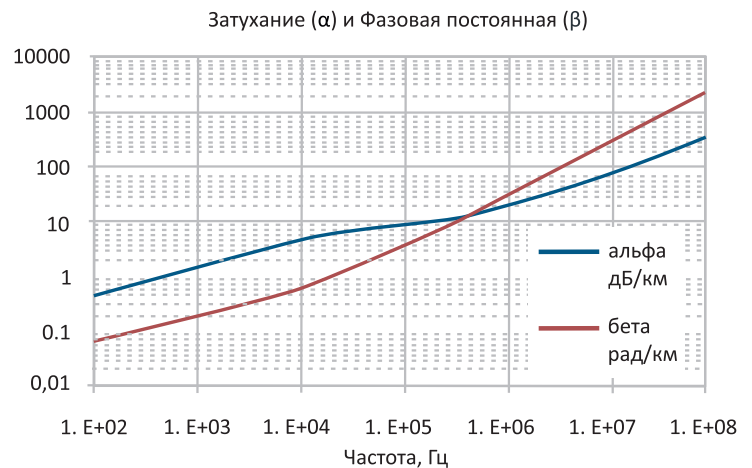
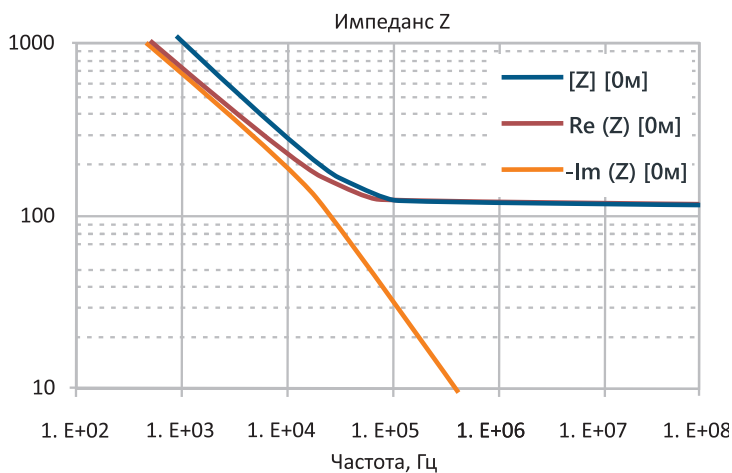


Рис. 1. Характеристический импеданс и постоянная распространения для медного кабеля парной скрутки

Для медного кабеля парной скрутки эти параметры показаны на рис. 1.

На высоких частотах уровни волнового сопротивления отклоняются от асимптотического значения, близко к  $\sim \sqrt{L/C}$ , при этом его мнимые части быстро стремятся к нулю. Наблюдаемый перегиб на кривых на частоте  $f \sim 100$  кГц обусловлен, главным образом, скин-эффектом, который преобладает на высоких частотах.

Эти параметры можно выделить из результата измерения с помощью АИУ, как описывается в следующем разделе.

## 2. ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ

Автоматическое измерительное устройство, состоящее из векторного анализатора цепей, коммутационной матрицы и кабельного интерфейса, может напрямую измерять комплексные коэффициенты отражения/передачи (S-параметры) испытываемого объекта. В свою очередь, кабельный интерфейс представляет собой тестовую оснастку, состоящую из различных соединительных приспособлений: разъёмов, переходников и т.п.

Типичная схема показана на рис. 2.

Параметры кабеля непосредственно связаны с комплексными S-параметрами (параметрами рассеяния). В частности, характеристический импеданс кабеля связан с  $S_{11}$  следующим образом:

$$Z_c = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (3)$$

при этом возвратные потери (RL) определяются, как:

$$Return Loss (RL) = -20 \log_{10} (|S_{11}|) [dB] \quad (4)$$

где  $S_{11}$  – отношение мощности отражённого сигнала к мощности падающего сигнала.

Чтобы составить план калибровки измеряемого объекта выполняется, так называемая, нуль-коррек-

ция для установки опорного значения с использованием популярного метода полной 2-, 4-портовой калибровки SOLT (Short-Open-Load-Through), где Short – КЗ (короткозамкнутая нагрузка), Open – ХХ (нагрузка холостого хода), Load – согласованная нагрузка и Through – перемычка между портами (прямое соединение). В зависимости от типа кабельного интерфейса можно выполнить пересчёт (т.е. деэмбеддинг), чтобы компенсировать влияние кабельного интерфейса на результирующую частотную характеристику. Следует отметить, что технически сложно математически рассчитать и устранить помехи, возникающие в результате воздействия кабельного интерфейса в сочетании с точной SOLT-калибровкой во всём частотном диапазоне.

На результат измерения кабеля будут оказывать влияние следующие факторы, степень воздействия каждого из которых нужно будет определить отдельно для надлежащего анализа данных:

- внутренние дефекты конструкции кабеля;
- рассогласование импеданса на обоих концах кабеля;
- подготовка кабеля для подключения к измерительному устройству;
- воздействие, связанное с калибровкой.

Производители стремятся выявить дефекты структуры кабеля, чтобы отделить их от других дефектов с целью непрерывного совершенствования производственного процесса на предприятии.

Рассогласование импеданса на обоих концах кабеля приведёт к многочисленным отражениям, особенно на низких частотах, где затухание в обе стороны намного меньше, чем на высоких частотах.

На высоких частотах результаты измерения будут подвержены влиянию нежелательных побочной ёмкости и индуктивности, что бывает обусловлено качеством разделки конца кабеля при его подключении к измерительному устройству.

Наконец, что не менее важно, калибровка с использованием эталонных SOLT-нагрузок, входящих в состав калибровочного набора, при недостаточно хо-

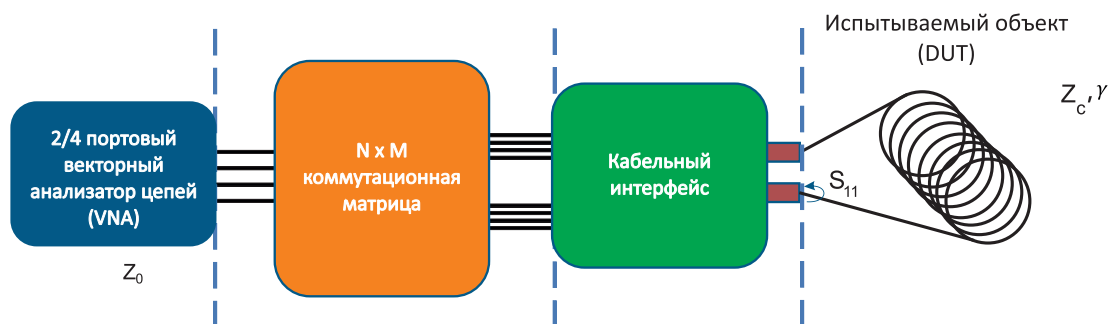


Рис. 2. Принципиальная схема АИУ с векторным анализатором цепей, коммутационной матрицей, кабельным интерфейсом и испытываемым объектом

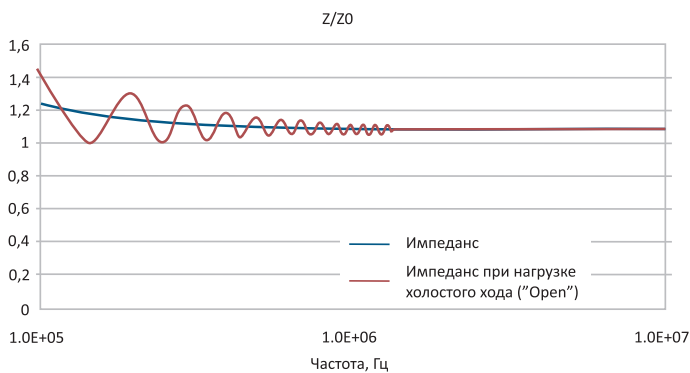


Рис. 3. Расчётный импеданс и смоделированный импеданс при нагрузке холостого хода для медной пары

рошем контакте, ведёт к ошибкам и сильно осложняет интерпретацию данных.

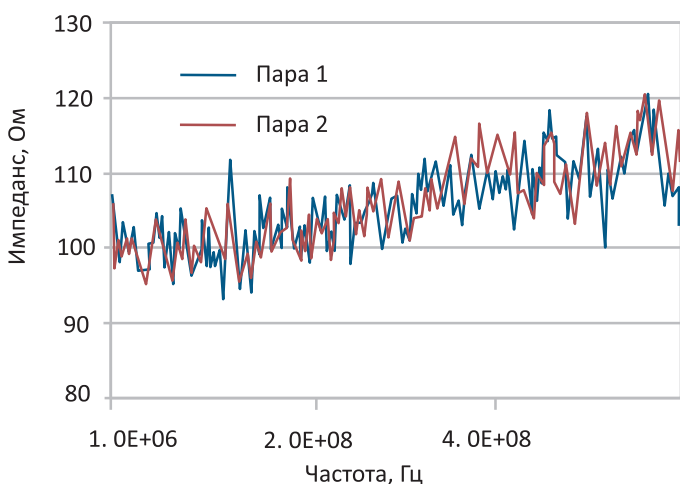
Для интерпретации или выделения соответствующих параметров кабеля можно использовать модели, учитывающие физическую природу этих эффектов и данные измерения. Например, моделирование эффекта отражения на неподключённый кабель («Open») показано на рис. 3.

Заметны колебания, связанные с отражением на дальнем конце кабеля при нагрузке холостого хода, что показывает сложность выделения корректного значения импеданса испытываемого объекта.

С целью оказания содействия при анализе данных в стандартах содержится описание различных методов и процедур коррекции. Среди них можно выделить:

- Метод Open/Short (холостого хода и короткого замыкания) для устранения рассогласования импеданса на дальнем конце кабеля (IEC/TR 62152) [2].

- Метод структурных возвратных потерь, основанный на результатах измерения нагрузки холостого хода и короткого замыкания, для устранения рассогласования импеданса на ближнем конце (IEC/ TR62152) [2].



- Поправка на побочную индуктивность с целью устранения побочной индуктивности на соединительном приспособлении при зажиме кабеля.

- Стробирование для устранения влияния кабельных разъемов.

В последующих разделах рассматриваются эти методы, их преимущества и недостатки, выявленные по результатам экспериментального тестирования с использованием автоматического измерительного оборудования. Сюда же входит и анализ данных в частотной и временной областях соответственно.

### 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

3.1 *Аппроксимация функции абсолютных значений характеристического импеданса (IEC 61156-1-2) [3].* На рис. 4 представлены кривые измеренного (верхний рисунок) и аппроксимированного, т.е. эмпирически подобранного (нижний рисунок) импеданса для медного кабеля парной скрутки (2 пары) в диапазоне от 1 до 600 МГц.

Вопреки ожиданиям, импеданс не стремится к асимптотическому значению, а продолжает расти на более высоких частотах. Это может происходить по ряду причин, среди которых и побочные эффекты, о которых говорилось в предыдущем разделе.

На рис. 4 (нижнем) импеданс аппроксимирован, т.е. эмпирически подобран, по методу наименьших квадратов согласно уравнению с 4 коэффициентами:

$$|Z_c| = K_0 + \frac{K_1}{\sqrt{f}} + \frac{K_2}{f} + \frac{K_3}{\sqrt{f^3}} \quad (5)$$

где  $K_0$  – внешняя индуктивность пары и её ёмкость;  $K_1$  – внутренняя (собственная) индуктивность;  $K_2$  и  $K_3$  – эффекты более высоких порядков.

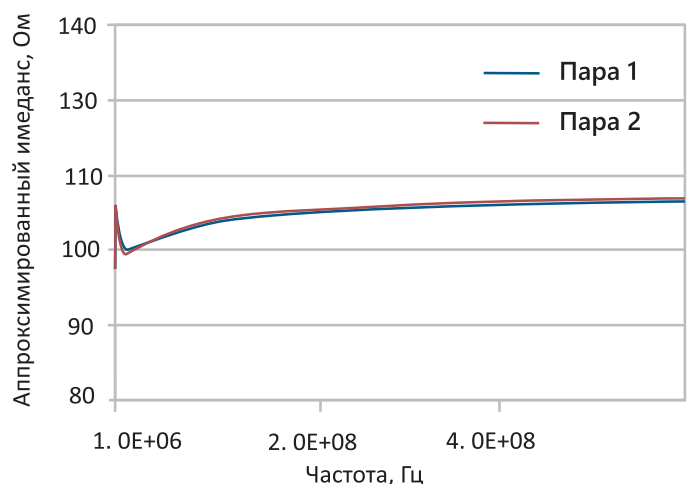


Рис. 4. Измеренный и аппроксимированный импеданс

Аппроксимация по методу наименьших квадратов выдаёт сглаженную кривую, которая приблизительно отображает значение импеданса, как функции частоты. Данный метод позволяет исключить помехи, вызванные структурными дефектами испытываемого объекта, и провести сравнение с ожидаемыми и/или заданными значениями импеданса [4]. В рассматриваемом выше примере, где значение импеданса увеличивается с ростом частоты, кривая аппроксимации отличается от формы кривых, представленных на рис. 1 и рис. 3.

**3.2 Поправка на побочную индуктивность (IEC 61156-1-5) [3].** То, как оператор подготовит кабель к испытанию и как подсоединит его к кабельному интерфейсу/соединительному приспособлению, может увеличить побочную индуктивность и/или ёмкость, что, в свою очередь, может повлиять на результаты измерения. Этим, отчасти, можно объяснить постоянное увеличение импеданса с ростом частоты, когда реактивная/мнимая составляющая накладывается на реальную компоненту  $Z$ . Такую побочную индуктивность можно смоделировать, а затем соответственно скорректировать импеданс.

На рис. 5 показаны импеданс и возвратные потери ( $RL$ ), измеренные до (синяя кривая) и после внесения поправки на побочную индуктивность (красная кривая). В данном случае, коррекция незначительна. Это можно объяснить слабой побочной индуктивностью, т.е. безупречным подключением кабеля к кабельному интерфейсу, и/или надлежащим образом выполненной нулевой калибровкой, в ходе которой были установлены опорные значения.

**3.3 Аппроксимированные возвратные потери (IEC 61156-1-5) [3].** Коррекция за счёт аппроксимации возвратных потерь базируется на теории передачи сиг-

налов по линиям связи, согласно которой на высоких частотах импеданс сходится асимптотически (рис. 1). Отклонение от этого асимптотического значения корректируется математически посредством аппроксимации следующим пошаговым образом [7]:

1. Кривая измеренного импеданса аппроксимируется по методу регрессии наименьших квадратов с применением функции только с 2 неизвестными коэффициентами:

$$Z_{fit} = K_0 + \frac{K_1}{\sqrt{f}} \quad (6)$$

Поскольку значения в области высоких частот предположительно хуже отображают реальные характеристики испытываемого объекта, аппроксимация выполняется в диапазоне до  $f_{max}$  нескольких сотен МГц.

2. Вычисляется разность между кривыми измеренных и аппроксимированных значений. В результате, получаем отклонения, которые предположительно обусловлены наличием побочных помех, не связанных с дефектами конструкции.

3. Этот разброс значений аппроксимируется по методу наименьших квадратов с использованием полинома  $n$ -й степени (в данном случае, эмпирическим путём установлено, что  $n = 6$ ).

4. Наконец, значения, полученные путём полиномиальной аппроксимации, вычитаются из первоначально измеренных данных, чтобы получить соответственно скорректированный импеданс и возвратные потери.

На рис. 6 показаны импеданс и возвратные потери до (измеренные) и после коррекции (скорректированные).

Заметно, что после коррекции график импеданса стал ближе к ожидаемому результату и, так

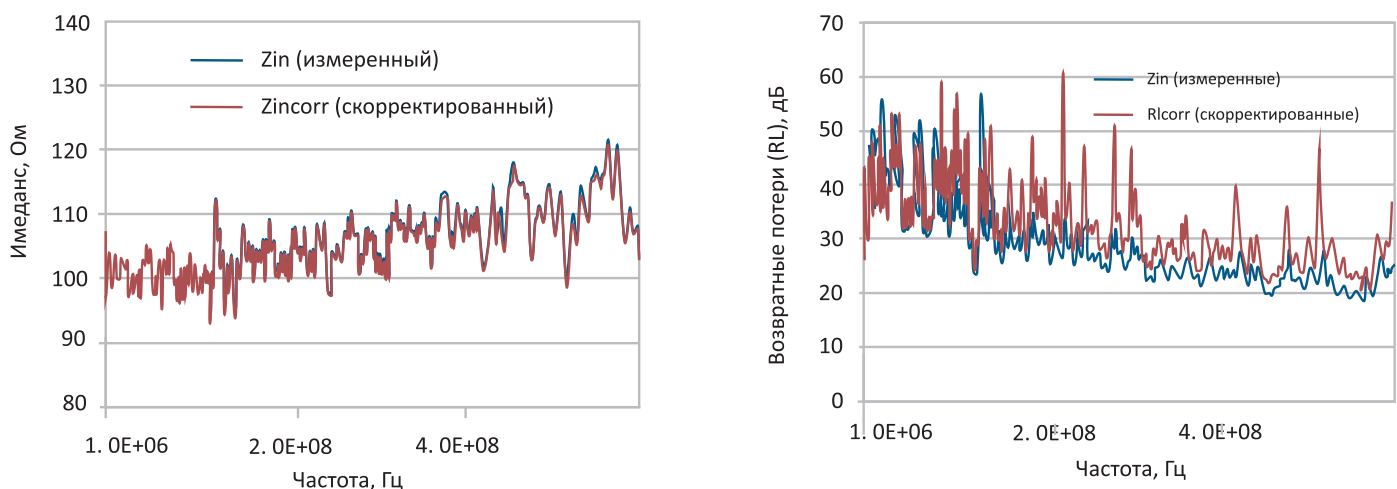


Рис. 5. Импеданс и возвратные потери: измеренные и с поправкой на побочную индуктивность

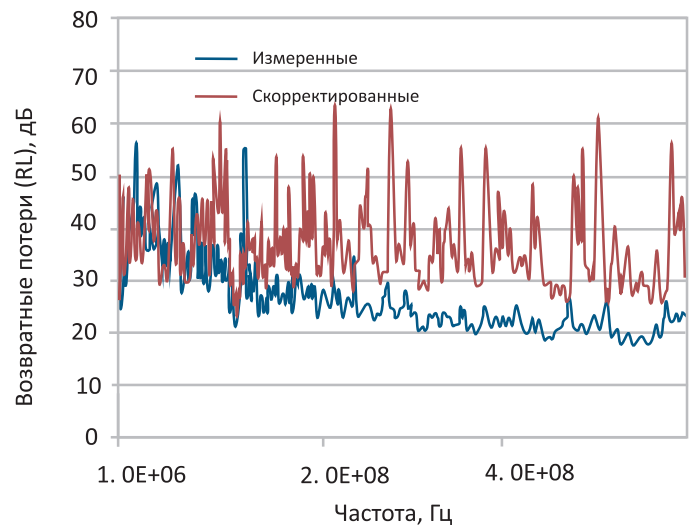
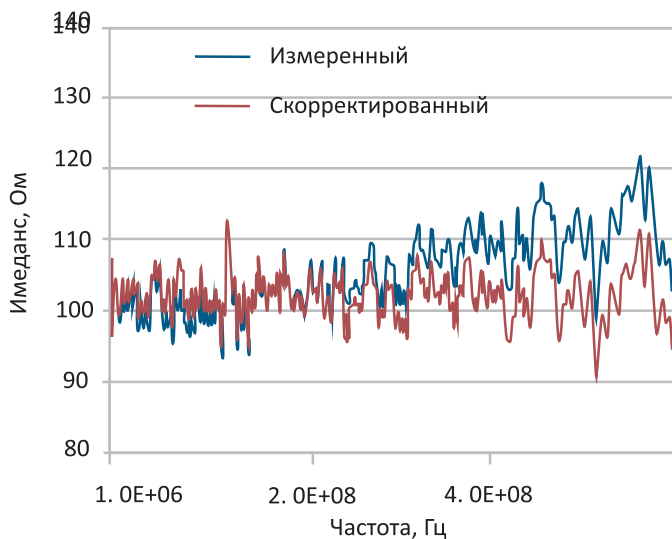


Рис. 6. Импеданс, измеренный и скорректированный по методу аппроксимации

называемые, аномальные отклонения частично устранены. Тем не менее, необходимо задаться вопросом, насколько обоснована эта многоступенчатая довольно сложная процедура, и имеют ли все эти математические аппроксимации реальный физический смысл.

#### 4. АНАЛИЗ ДАННЫХ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

**4.1 Стробированные возвратные потери (IEC 61156-1-5) [3].** Любые дефекты или рассогласования импеданса будут находить своё отражение в амплитудно-частотной характеристике испытываемого объекта. С помощью импульсного рефлектометра (TDR) эти аномалии преобразуются в хорошо локализуемые пики во временной области. Однако в отличие от векторного анализатора цепей (VNA), приёмная часть которого характеризуется узкой полосой пропускания, в TDR реализован фильтр с широкой полосой пропускания, что ведёт к ухудшению значений отношения сигнал/шум. Таким образом, АИУ с расширенным динамическим диапазоном существенно выигрывает и является более эффективным по сравнению с TDR при выполнении тестовых измерений как в частотной, так и во временной областях [4].

Временное стробирование – это хорошо известный метод анализа сигналов, позволяющий выделить отдельный выходной сигнал во времени и соответственно в пространстве, если известна постоянная распространения. При измерении кабеля данный метод предполагает выполнение следующих действий:

- измерение в частотной области;
- обратное дискретное преобразование Фурье, чтобы перейти во временную область;

- использование строб-импульса, чтобы искусственно устранить пики во временном спектре;
- дискретное преобразование Фурье, чтобы вернуться в частотную область.

На рис. 7 показано нормальное или абсолютное значение параметра  $S_{11}$  во временной области. Горизонтальная ось была преобразована в длину кабеля с использованием постоянной распространения, равной ~70 % от скорости света в вакууме  $c_0$ . Кривые синего, зелёного и красного цвета соответствуют исходному значению параметра ( $S_{11}$ ), применённому строб-импульсу и результирующему значению ( $S_{11}$ ) соответственно.

На рис. 8 показаны графики расчётного импеданса и возвратных потерь (RL) до и после стробирования.

На графике импеданса видно, что стробирование помогло устранить незначительное увеличение  $Z$  с ростом частоты. Аналогичным образом график возвратных потерь после стробирования выглядит сглаженным, за исключением области низких частот.

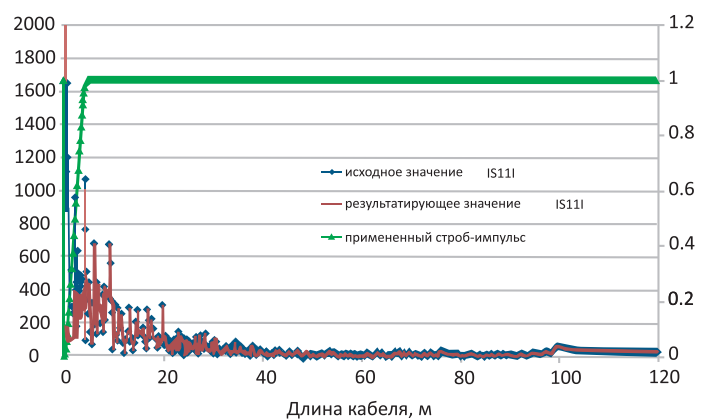


Рис. 7. Параметр  $S_{11}$  во временной области

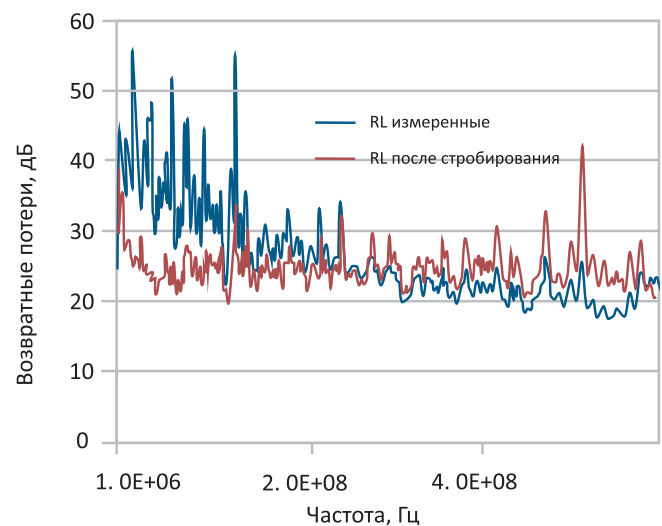
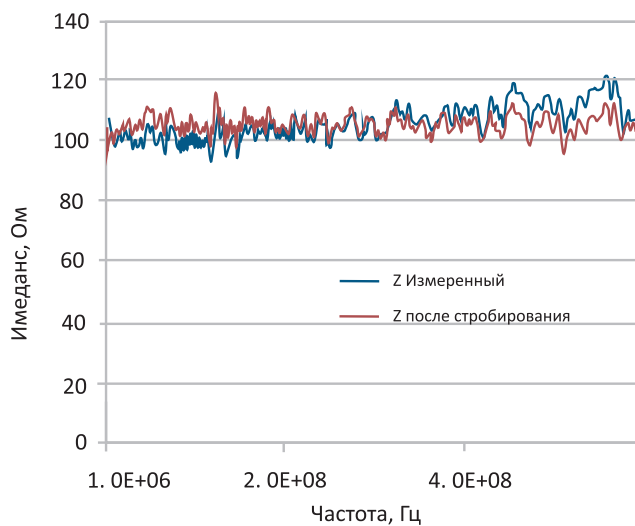


Рис. 8. Импеданс и возвратные потери: измеренные и после стробирования

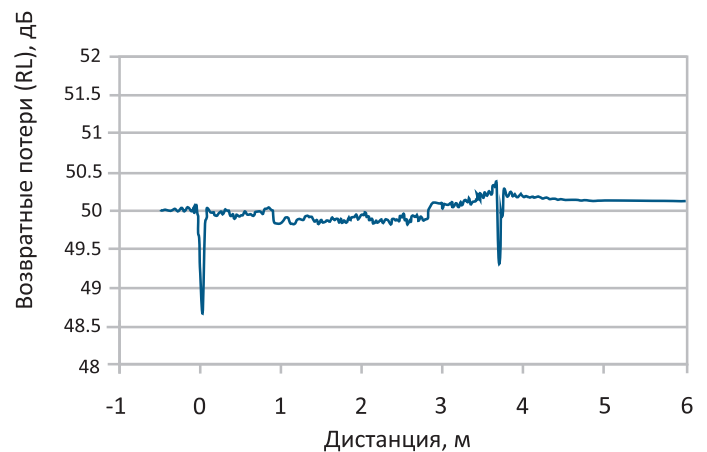
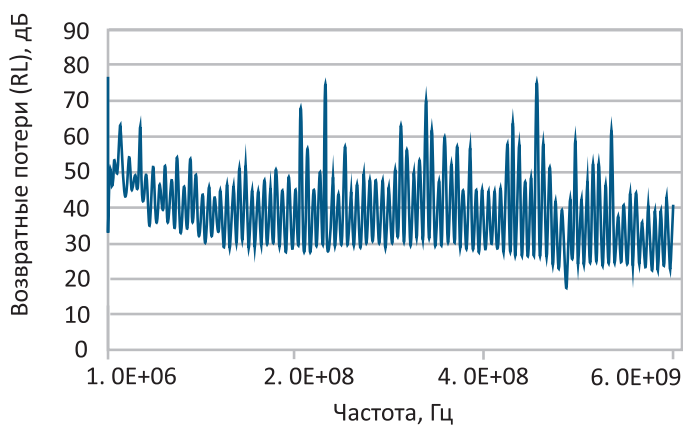


Рис. 9. Возвратные потери, измеренные на коротком (3,5 м) коаксиальном кабеле и его рефлектометрия

**4.2 Оценка данных во временной области.** Как было отмечено в предыдущем разделе, очень полезной может быть интерпретация данных непосредственно во временной области. Например, это позволяет проверить значение импеданса на всей длине кабеля, верифицировать точную длину кабеля (зная скорость распространения сигнала), контролировать наличие разъемов, выявить локализованные дефекты, и т.д.

Компания AESA разработала полностью автоматизированную процедуру для анализа данных во временной области. Эта процедура реализована на АИУ, которое сначала выполняет измерения в частотной области, после чего, используя преобразование Фурье, переключается во временную область. На рис. 9 показан результат измерения коаксиального соединительного кабеля длиной 3,5 м на частотах до 6 ГГц.

График рефлектометрии (рис. 9) показывает положение разъемов (в точках 0 м и 3,5 м) в сочетании со значением импеданса кабеля. Поскольку вектор-

ный анализатор цепей не опускается до значения постоянного тока, преобразование Фурье не позволяет получить точные значения импеданса, поэтому приходится делать ряд поправок, чтобы получить 50 Ом.

## 5. ВЫДЕЛЕНИЕ ПОБОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ

Как уже было отмечено в предыдущих разделах, соединительные приспособления для испытания кабелей являются источником побочных эффектов, что затрудняет анализ результатов измерения. Таким образом, выделение таких побочных эффектов (деэмбединг) представляет собой ещё один способ устранения их негативного влияния. Это можно сделать путём отсечения S-матрицы соединительных приспособлений, от результатов измерения и/или электромагнитного (ЭМ) моделирования, где S-параметры являются элементами S-матрицы.



Тем не менее, несмотря на то, что очень удобно описывать систему, имеющую  $n$  число портов,  $S$ -матрица не очень хорошо подходит для того, чтобы охарактеризовать отклик от каскадной системы. Для этого, в данном случае, используется  $T$ -матрица, которая непосредственно привязывает электромагнитные волны к входу(-ам) и выходу(-ам). Для каскадной системы результирующая  $T$ -матрица представляет собой произведение элементов отдельных  $T$ -матриц, перемноженных слева направо [5].

С учётом двух соединительных приспособлений  $A$  и  $B$  на ближнем и дальнем концах кабеля, получается:

$$[T_{measured}] = [T_A][T_{Cable}][T_B] \quad (7)$$

Следовательно,

$$[T_{Cable}] = [T_A]^{-1}[T_{measured}][T_B]^{-1} \quad (8)$$

После внесения поправок  $T$ -параметры преобразуются обратно в  $S$ -параметры для оценки характеристик кабеля. Формулу преобразования из  $S$ -матрицы в  $T$ -матрицу и обратно можно найти в [6].

Следует отметить, что процесс деэмбединга позволяет математически выделить частотную характеристику соединительных приспособлений от частотной характеристики самого кабеля во всём исследуемом диапазоне частот.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены сложности определения характеристик кабеля/испытываемого объекта с использованием АИУ, в состав которого входят различные функциональные узлы, включая векторный анализатор цепей, тестовая оснастка для испытания кабеля, интерфейсы и т.д... Главная цель заключается в том, чтобы оценить собственные свойства кабеля, но эти функциональные узлы воздействуют на итоговый результат измерения.

Соответственно, в статье рассмотрены различные процедуры, способные ослабить влияние нежелательных побочных эффектов и факторов возмущения, обусловленные подготовкой кабеля к испытанию, для того чтобы экспериментальные данные лучше согласовывались с теоретическими расчётами. Помимо этого, в статье продемонстрирована значимость проведения анализа во временной области, что помогает выявить и локализовать дефекты.

Тем не менее, внесение поправок базируется на математических расчётах, что не всегда согласуется с реальной аппаратной частью.

Более того, точность результатов сильно зависит от процедур калибровки. Поэтому, в рамках последу-

ющей исследовательской деятельности предлагается сосредоточиться на разработке:

- эталонных нагрузок (калибровочного набора), которые при подключении к коммутационной панели имитировали бы свойства «идеального» кабеля, т.е. не привносили бы собой нежелательные эффекты;
- полного ЭМ-моделирования соединительных приспособлений для испытания кабеля с целью выявления и устранения побочных помех.

## Список литературы

1. **Meinke H., Gundlach F.** Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. – 4 Auflage. – Heidelberg: Springer, 1986. ISBN 3-540-15393-4.
2. IEC/TR 62152–2009. Передаточные свойства каскадных двух- и четырёхполюсников. Классификация терминов и определений.  
URL: <http://docs.cntd.ru/document/551291320> (дата обращения: 27.12.2020).
3. IEC/TR 61156-1-6–2016. Кабели многожильные и симметричные парной/четверной скрутки для цифровой связи. Часть 1–6. Номинальные значения сопротивления постоянному току кабелей напольной проводки и кабелей рабочего места для цифровой связи.  
URL: <http://docs.cntd.ru/document/551290619> (дата обращения: 29.12.2020).
4. Comparison of Measurement Performance between Vector Network Analyzer and TDR Oscilloscope.  
URL: [http://www.tamsystech.com/wp-content/uploads/2018/08/Comparison\\_of\\_Measurement\\_Performance\\_between\\_Vector\\_Network\\_Analyzer\\_and\\_TDR\\_Oscilloscope.pdf](http://www.tamsystech.com/wp-content/uploads/2018/08/Comparison_of_Measurement_Performance_between_Vector_Network_Analyzer_and_TDR_Oscilloscope.pdf) (дата обращения: 27.12.2020).
5. **Kurokawa K.** Power waves and the scattering matrix // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1965. – № 13. – P. 194–202.  
URL: <https://ru.scribd.com/document/335699142/Kurokawa-Power-Waves-and-Scattering-Matrix-1965> (дата обращения: 30.12.2020).
6. S-parameter design, Hewlett-Packard Application Note 154, 1990.  
URL: [https://www.hpmemoryproject.org/an/pdf/an\\_154.pdf](https://www.hpmemoryproject.org/an/pdf/an_154.pdf) (дата обращения: 29.12.2020).
7. **Caspers F.** et al. RF measurement concepts // Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School. – Trondheim, Norway, 19–29 August 2013, edited by W. Herr, CERN-2014-009 (CERN, Geneva, 2014)  
URL: <https://s3.cern.ch/inspire-prod-files-2/2f05356da700c4e8495d735e4f4747c0> (дата обращения: 27.12.2020).

*Перевод статьи подготовлен сотрудниками  
ЗАО «Торговый дом ВНИИКТ»  
М.О. Башлыковым и А.А. Мешалкиным.*