

Минимизация методической погрешности измерений частотных характеристик волнового сопротивления витых пар

Андрей Владимирович Кочеров¹, Андрей Борисович Семенов^{2✉}, Виктор Иванович Руденко³, Виктория Викторовна Смирнова⁴

¹ Индивидуальный предприниматель Кочеров А. В., Зеленоград, Москва, Россия, andrey.kocherov@yandex.ru

² Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, andre52.55@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-8220-6904>

³ Научно-производственное предприятие «Информсистема», Ростов-на-Дону, Россия, vrudenko@yandex.ru

⁴ Самарская Кабельная Компания, Самара, Россия, smirnova@samaracable.ru

Аннотация. Дан краткий обзор стандартов, необходимых при серийном производстве LAN-кабелей различных категорий. Показано, что для LAN-кабелей из витых пар категорий 5е и выше требуется доработка процедуры измерений ключевых частотных характеристик (в частности, определения частотной зависимости фактического значения волнового сопротивления), регламентируемой действующим ГОСТ Р 54429-2011 «Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. Общие технические условия». Выявлена причина ошибок сетевых анализаторов – влияние протяжённого участка разделки, и обоснована гипотеза о невозможности её устранения в рамках существующих моделей. Сформулирована гипотеза об интерференции сигналов, отражённых от начала витой пары и от места её входа в оболочку, как основной причины искажения результатов практических измерений. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие корректность выдвинутых предположений. Предложена модернизация процедуры калибровки измерительной системы без доработки аппаратной части и программного обеспечения векторного анализатора цепей. Требуемый результат достигнут применением распределённой индивидуальной для каждого типа кабеля калибровочной нагрузки на основе отрезка витой пары, которая изготавливается в производственной лаборатории. С использованием расчётных данных и результатов измерений показано, что применение такой нагрузки уменьшает с 14 до 3 % методическую погрешность измерений волнового сопротивления широко распространённых кабелей категории 5е. Полученные результаты инвариантны к типу измерительной системы и могут быть использованы при производственном тестировании современных LAN-кабелей высоких категорий.

Ключевые слова: LAN-кабель, витая пара, затухание отражения, волновое сопротивление, импеданс, векторный анализатор цепей, распределённая нагрузка

Для цитирования: Кочеров А. В., Семенов А. Б., Руденко В. И., Смирнова В. В. Минимизация методической погрешности измерений частотных характеристик волнового сопротивления витой пары // Измерительная техника. 2022. № 9. С. 57–62. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-9-57-62>

Reduction of the methodological error in measuring the frequency characteristics of the impedance of LAN cables

Andrey V. Kocherov¹, Andrey B. Semenov^{2✉}, Viktor I. Rudenko³, Viktoria V. Smirnova⁴

¹ Individual entrepreneur Kocherov A. V., Zelenograd, Moscow, Russia, andrey.kocherov@yandex.ru

² Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, andre52.55@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-8220-6904>

³ Laboratory of NPP Informssystem LLC, Rostov-on-Don, Russia, vrudenko@yandex.ru

⁴ Samara Cable Company, Samara, Russia, smirnova@samaracable.ru

Abstract. A brief overview of the standards required for the serial production of LAN cables of various categories is given. It is shown that for twisted pairs LAN cables of categories 5e and higher, it is necessary to finalize the procedure for measuring key frequency characteristics (in particular, determining the frequency dependence of the actual value of the wave resistance), regulated by the current GOST R 54429-2011 “Symmetrical pair communication cables for digital transmission systems. General technical specification”. The reason for the errors of network analyzers – the influence of an extended cutting section – is revealed, and the hypothesis that it is impossible to eliminate it within the framework of existing models is substantiated. A hypothesis is formulated about the interference of signals reflected from the beginning of the twisted pair and from the place of its entry into the shell as the main cause of distortion of the results of practical measurements. Experimental data confirming the correctness of the proposed assumptions are presented. The modernization of the calibration procedure of the measuring system is proposed without updating the hardware and software of the vector circuit analyzer. The desired result is achieved by using a distributed calibration load, individual for each type of cable, based on a segment of a twisted pair, which is manufactured in a production laboratory. Using calculated data and measurement results, it is shown that the use of such a load reduces from 14 to 3 %

the methodological error in measuring the impedance of widespread category 5e cables. The results obtained are invariant to the type of measuring system and can be used in the production testing of modern LAN cables of high categories.

Keywords: LAN cable, twisted pair, return loss, impedance, vector network analyzer, distributed load

Введение. Современный объект промышленного и гражданского назначения обязательно содержит информационно-телекоммуникационную систему. Последняя реализуется с учётом проверенной временем семиуровневой сетевой модели Open Systems Interconnection (OSI). Несмотря на определённые достижения техники беспроводного доступа, в качестве основы физического уровня в силу ряда известных причин используются преимущественно проводные каналы связи, которые реализуются на основе симметричных LAN-кабелей (LAN, local area network – локальная сеть) из витых пар. За системами Wi-Fi остаются конкретные области применения, главным образом гостевые сети. LAN-кабели популярны также при построении сетей доступа [1].

Отечественной промышленностью серийно выпускаются LAN-кабели различных категорий, контроль их качества потребовал введения соответствующей нормативной базы [2]. При производстве кабелей руководствуются национальным стандартом ГОСТ Р 54429-2011¹ [3], который заменил ГОСТ Р 53245-2008² и ГОСТ Р 53246-2008³ [4]. При разработке ГОСТ Р 54429-2011, в том числе из соображений гармонизации с международной нормативной базой, учтены положения стандартов группы IEC 61156, а также особенности национального рынка LAN-кабелей. Некоторое влияние на нормативную часть документа оказал опыт, накопленный отраслью в процессе построения структурированных кабельных систем и сетей доступа на основе витых пар.

ГОСТ Р 54429-2011 в целом положительно встречен специалистами, однако десятилетний опыт его применения выявил ряд недостатков документа, связанных со сложностью практической реализации и даже определённой противоречивостью некоторых положений. Актуальность выявленных недочётов также обусловлена тем, что за истёкший период стандартизированы категории 8.1 и 8.2 LAN-кабелей, для которых верхняя граница диапазона частот контроля достигла 2000 МГц [5].

Цель настоящей статьи – доработать для LAN-кабелей описанные в ГОСТ Р 54429-2011 процедуры измерений ключевых частотных характеристик: затухания отражения $RL(f)$ и волнового сопротивления (импеданса) $Z_c(f)$ и представить результаты практического тестирования кабелей из витых пар с учётом достигнутого технического уровня измерительной аппаратуры.

Особенности процесса контроля LAN-кабелей. LAN-кабель как высокотехнологичное изделие характеризуется параметрами, нормированными в ГОСТ Р 54429-2011, в том числе затуханием отражения, порождаемом соотношением величин фактического и номинального импеданса пары, а также

неоднородностью импеданса. Частотные характеристики импеданса рекомендовано вычислять по комплексному коэффициенту отражения или по задержке в паре и ёмкости пары (см. ГОСТ Р 54429-2011, формулы (50), (51) соответственно).

На производстве для контроля качества жёстких инсталляционных (solid) и гибких шнуровых (stranded или multi wire) кабелей применяют измерительные системы, например, DCM 3S-XLD (Beta LaserMike, США), Vega AXT (AESA Cortailod, Швейцария), CTS-650L (SECRI, КНР) и A132 (Россия). Такие системы содержат широкополосные векторные анализаторы цепей (ВАЦ) и коммутатор, заканчивающийся симметричным разъёмом с импедансом, равным 100 Ом.

В ГОСТ Р 54429-2011 косвенно определены требования к конструкции измерительного коммутатора и габаритам клемм на панели подключения: в п. 5.2.1.8 задан предел парной ёмкости LAN-кабелей, составляющий 100 пар; в пп. 5.2.2.4, 5.2.2.5 поставлены задачи контроля сопротивления и электрической прочности изоляции при напряжении до 1000 В; в п. 5.2.2.18 применительно к кабелям категории 7А включено требование создать условия для измерения переходного затухания не менее 78 дБ на частоте 100 МГц. Необходимость совместного обеспечения этих требований обуславливает расположение клемм на панели подключения по кругу радиусом не менее 20 см. Для подключения кабеля к такой панели следует снять внешний покров, удалить экран и разделить подключаемый кабель на значительной длине. Кроме того, необходимо выполнить «раскрыв» (развивку) проводов подключаемой витой пары. Эти обстоятельства оказывают значимое влияние на результаты измерений частотных характеристик кабеля. На рис. 1 представлены схема участка подключения витой пары и рефлектограмма $\Gamma(x)$ как зависимость коэффициента отражения Γ от длины кабеля x , отсчитываемой от клемм средства измерений (плоскости калибровки $P1$). По сравнению со случаем близкого к идеальному согласования (кривая 2) участок разделки вызывает два сильных отражения (кривая 1): от места подключения пары к клеммам ($P1$) и от входа разделанной пары в измеряемый кабель ($P2$). Эти отражения не учитываются в методике ГОСТ Р 54429-2011, оказывают значимое влияние на результаты измерений и должны быть устранены.

Обзор результатов измерений LAN-кабелей. Согласно данным Самарской кабельной компании (СКК) для F/UTP-кабелей при разной длине разделки отмечены как существенная неравномерность частотной характеристики

¹ ГОСТ Р 54429-2011. Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. Общие технические условия.

² ГОСТ Р 53245-2008. Информационные технологии. Системы кабельные структурированные. Монтаж основных узлов системы. Методы испытания.

³ ГОСТ Р 53246-2008. Информационные технологии. Системы кабельные структурированные. Проектирование основных узлов системы. Общие требования.

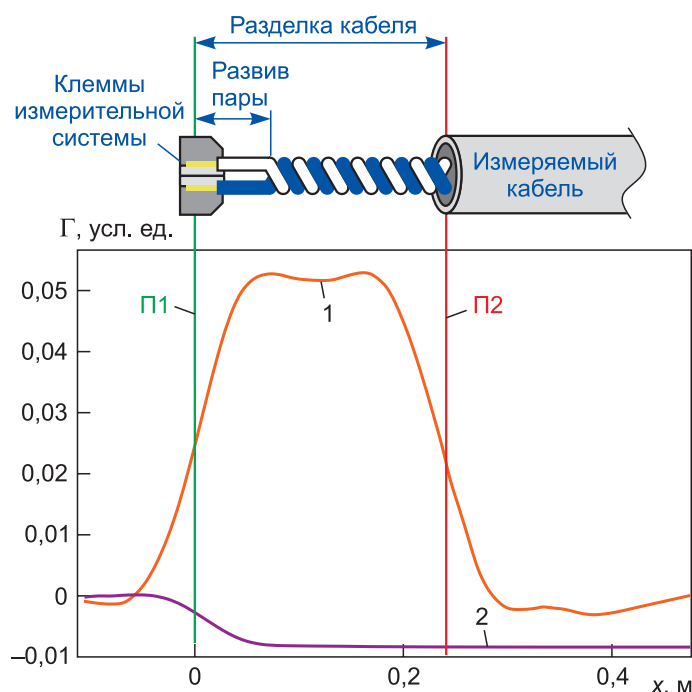


Рис. 1. Рефлектограмма коэффициента отражения Γ начального участка витой пары и перенос плоскости калибровки путём использования распределённых нагрузок:

$P1$ – плоскость калибровки сосредоточенной нагрузкой (показана без учёта влияния участка разделки кабеля); $P2$ – плоскость калибровки распределённой нагрузкой; 1 – подключение кабеля с участком разделки; 2 – подключение согласованной нагрузки

Fig. 1. The reflectogram of the reflection coefficient Γ of the initial section of the twisted pair and transfer of the calibration plane by using distributed loads: $P1$ – concentrated load calibration plane; $P2$ – distributed load calibration plane; 1 – connection of the cable with the cutting section; 2 – connection of the matched load; the calibration plane is shown without taking into account the influence of the cable cutting section

волнового сопротивления в рабочей полосе 0–100 МГц (рис. 2, а), так и заметное увеличение сглаженного значения, составляющее примерно 10 Ом (рис. 2, б). Аналогичные результаты были получены также компанией Спецкабель [6].

В работе [7] специалисты швейцарской компании AESA Cortaillood – ведущего производителя измерительных систем – указывают на повышение измеренного импеданса $Z_c(f)$ витых пар кабеля с увеличением частоты до 600 МГц. В качестве причины этого авторы [7] полагают увеличение индуктивности, возникающей в раскрыве пары при её подключении к разъёмам измерительной системы.

Согласно результатам выполненных авторами настоящей статьи измерений в полосе частот $f=0\dots500$ МГц изменение импеданса носит не монотонный, а осциллирующий характер. На рис. 3 показана осцилляция частотной характеристики измеренного системой A132 импеданса голубой пары четырёхпарного F/UTP-кабеля при длинах участка разделки 51 и 27 см (соответственно а, б), откуда следует, что период осцилляции обратно пропорционален длине разделки. Частота осцилляции уменьшается примерно

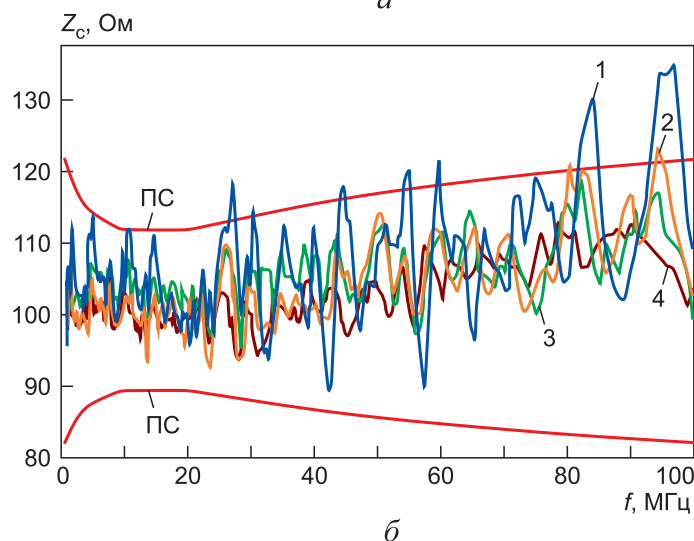
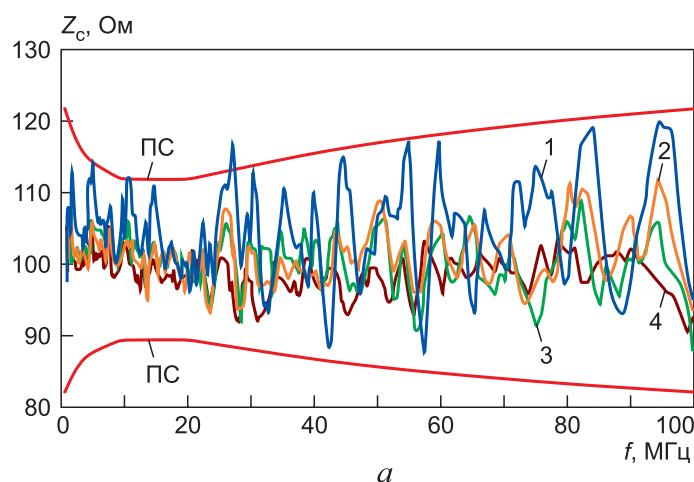


Рис. 2. Частотная характеристика импеданса витых пар четырёхпарного (1–4 – пары) пучка 50-парного F/UTP-кабеля при длинах участка разделки 10 и 50 см – соответственно а, б; ПС – пределы стандарта

Fig. 2. Frequency response of the twisted pairs impedance of a 4-pair beam (1–4 – pairs) of a 50-pair F/UTP cable for a cutting length of 10 cm (a) and 50 cm (b); LS – limits of the standard

с 380 МГц при длине разделки 27 см до 200 МГц при длине разделки 51 см.

Кардинальным решением проблемы устранения неравномерности частотных характеристик при контроле симметричных многопарных кабелей мог бы стать переход на метод измерений импеданса по задержке и ёмкости, свободный от быстрых и медленных осцилляций [8]. Однако не каждая измерительная система способна определять импеданс по задержке и ёмкости, вычисляя импеданс только по отражению. Но любую такую систему можно откалибровать, в том числе с учётом особенностей подключения.

Таким образом, необходимо решить проблему влияния протяжённого участка разделки кабеля на измеряемые характеристики согласованности путём применения распределённых и индивидуальных для каждого типа кабеля калибровочных нагрузок.

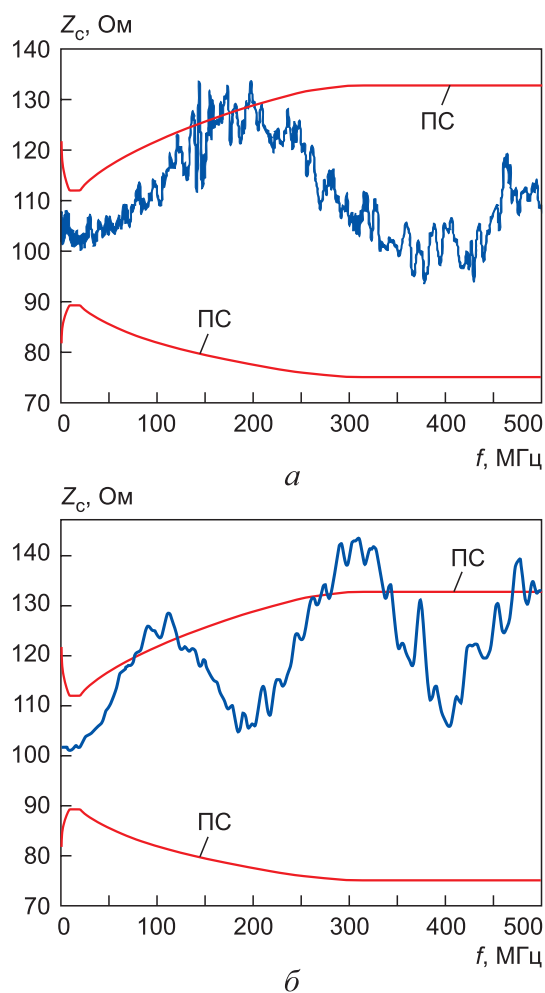


Рис. 3. Осцилляция частотной характеристики измеренной системой A132 в частотном диапазоне до 500 МГц импеданса голубой пары четырёхпарного F/UTP-кабеля при длинах участка разделки 27 и 51 см – соответственно *a*, *б*; ПС – пределы стандарта

Fig. 3. Oscillation of the frequency response of the blue pair impedance of a 4-pair F/UTP cable measured by the A 132 system in the range up to 500 MHz with cutting section lengths of 27 cm (*a*) and 51 cm (*b*); LS – limits of the standard

Исследование причин нарушения норм импеданса.

Модель влияния участка разделки. Измерению частотной характеристики обычно предшествует калибровка измерительной системы, для чего её выход последовательно подключают к сосредоточенным нагрузкам – согласованной, холостого хода и короткого замыкания. Но между разъёмами системы и телом контролируемого кабеля вынужденно располагается участок разделки, длина которого увеличивается с увеличением числа пар в измеряемом кабеле. Так как выделенная из тела кабеля пара не окружена диэлектриком и соседними парами, то её ёмкость меньше, а следовательно, выше импеданс, чем у той же пары, находящейся под оболочкой за пределами участка разделки, для которого производители стремятся обеспечить соответствие норме 100 Ом. Поэтому можно ожидать, что измерительный сигнал ВАЦ дважды отразится и вернется в ВАЦ.

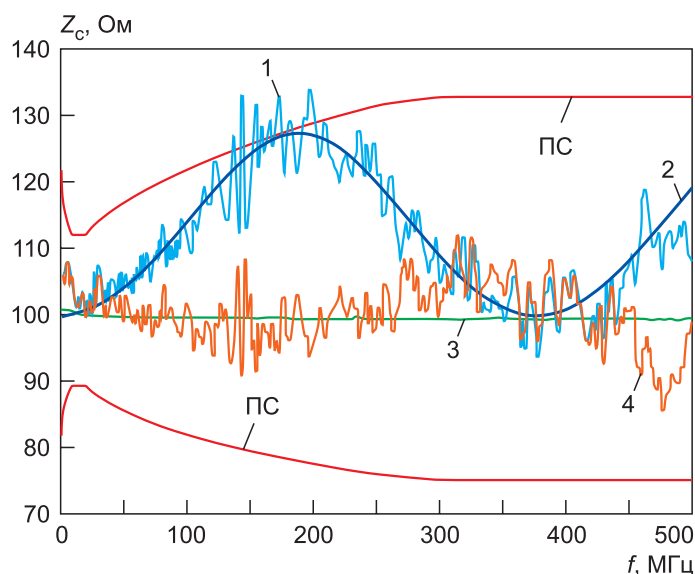


Рис. 4. Частотные характеристики импеданса: 1, 4 – значения импеданса, измеренные после обычной калибровки и после калибровки порта с применением комплекта распределённых нагрузок соответственно; 2 – расчёт импеданса по модели; 3 – импеданс, измеренный по ёмкости и задержке

Fig. 4. Frequency response of the impedance: 1, 4 – impedance values measured after normal calibration and after port calibration using a set of distributed loads, respectively; 2 – impedance calculation according to the model; 3 – impedance measured by capacitance and delay

Первое синфазное отражение происходит от стыка откалиброванной на нагрузку 100 Ом измерительной системы и начала участка разделки с повышенным импедансом. Для неэкранированной пары в экранированном или неэкранированном кабеле (F/UTP, U/UTP) импеданс пары на участке разделки на 9–13 % превышает импеданс пары в теле кабеля.

В примере, рефлектограмма которого показана на рис. 1, частотная характеристика импеданса – на рис. 3, 4, первое отражение соответствует времени $t=0$, а коэффициент отражения от участка разделки определяется по рефлектограмме и в конкретном случае (см. рис. 1) составляет $\Gamma_p \approx 0,052 - (-0,008) = 0,06$. Следует заметить, что в конкретном случае такое отражение соответствует участку разделки, импеданс Z_p которого весьма существенно отличается от номинала 100 Ом:

$$Z_p = Z_0 \frac{1 + \Gamma_p}{1 - \Gamma_p} = 100 \frac{1 + 0,060}{1 - 0,060} = 112,8 \text{ Ом.}$$

где Z_0 – сопротивление согласованной нагрузки, использованной при калибровке.

Считая, что создаваемое ВАЦ напряжение $u=1$, можно выразить отражение от первой неоднородности в виде

$$u_1(f, t) = \Gamma_p [\cos(2\pi f t) + j \sin(2\pi f t)]. \quad (1)$$

Вторым – противофазным – будет отражение от точки входа разделанной пары с повышенным импедансом в кабель,

где импеданс пары близок к норме. Задержка τ между сигналами отражений снимается с конкретной рефлектограммы или вычисляется как

$$\tau = 2x/v, \quad (2)$$

где x – длина участка разделки; v – скорость волны на участке разделки.

На рефлектограмме (см. рис. 1) второе отражение соответствует времени задержки 2,4 нс. Затуханием на таком коротком участке разделки можно пренебречь, тогда отражение от второй неоднородности будет соответствовать выражению

$$u_2(f, t) = -\Gamma_p [\cos(2\pi f(t - \tau)) + j\sin(2\pi f(t - \tau))]. \quad (3)$$

Покажем, что нарастание измеренного импеданса в начале диапазона частот и его осцилляция в расширенном диапазоне являются следствием интерференции отражений (1), (3). Если оставить только зависимость от начальной фазы, то коэффициент отражения примет вид

$$\Gamma(f) = 2\Gamma \sin(\pi f t) [\sin(\pi f t) + j\cos(\pi f t)]. \quad (4)$$

Зависимость импеданса от частоты при таких же условиях описывается как

$$Z(f) = Z_0 \frac{1 + \Gamma(f)}{1 - \Gamma(f)}. \quad (5)$$

Результаты расчёта по предложенной модели (2), (4), (5) представлены на рис. 4. Совмещение результатов моделирования и измерений демонстрирует совпадение по основной осцилляции, т. е. подтверждает верность гипотезы о формировании методической погрешности измерения импеданса за счёт отражений измерительного сигнала от неоднородностей, вносимых протяжённым участком разделки.

Устранение влияния неоднородностей. Минимизация длины участка разделки в целях снижения методической погрешности при измерении частотных характеристик отражения и импеданса кабеля невозможна из-за конечных габаритов разъёмов на панели подключения измерительной системы.

Устранить влияние неоднородностей на получаемый результат можно смещением плоскости калибровки от разъёмов в область обреза оболочки. Калибровка проводится в трёх режимах (холостого хода, короткого замыкания и согласованной нагрузки), соответственно необходим комплект из распределённых калибровочных нагрузок. Они представляют собой отрезки витой пары, длины которых соответствует длине разделки тестируемого кабеля (см. рис. 1). При этом процедура калибровки ВАЦ измерительной системы не изменяется и корректировать его программное обеспечение не требуется. На одном конце витой пары калибровочных нагрузок предусмотрены штыревые контакты для подключения к розеткам измерительной системы. Второй конец отрезков витой пары нагружен или на чип-резистор сопротивлением 100 Ом, габариты которого близки к расстоянию

между проводами пары, или на замыкание (режим короткого замыкания), или на разрыв (режим холостого хода).

Шаги скрутки витых пар LAN-кабелей отличаются друг от друга для подавления переходных помех, не стандартизованы и подбираются при конструировании индивидуально с учётом характеристик крутильных машин и иных технологических параметров [9]. Таким образом, калибровочные нагрузки представляют собой комплект из трёх различных элементов для каждой пары и должны изначально согласовываться с типом тестируемого кабеля. Подобные распределённые калибровочные комплекты достаточно просто изготавливаются в заводской лаборатории непосредственно из витых пар тестируемого LAN-кабеля.

Практическое доказательство эффективности модернизации процесса калибровки измерительной системы. Действенность и практическая пригодность для тестирования предложенной процедуры измерений проверяли сравнением результатов, полученных при калибровке ВАЦ измерительной системы типовой сосредоточенной и модернизированной распределённой калибровочными нагрузками.

Частотная характеристика 3 (см. рис. 4) представляет собой импеданс, измеренный по ёмкости и задержке, а характеристика 4 – импеданс, измеренный после калибровки порта с применением комплекта распределённых нагрузок, обеспечивающих перенос плоскости калибровки к началу неразделанного кабеля.

Из вида частотной характеристики следует, что применение соответствующего калибровочного комплекта позволяет эффективно скомпенсировать интерференцию, возникающую в результате отражений от начала и конца участка разделки витой пары. Перенос плоскости калибровки анализатора позволяет уменьшить методическую погрешность в полосе частот 1–500 МГц, что обеспечивает контроль характеристик многопарных кабелей (до категории 6А), а применительно к наиболее распространённым 5е-кабелям отклонение от значения 100 Ом в полосе 0–100 МГц уменьшается с 14 до 3 % (см. рис. 4, кривые 1–4).

Дополнительные результаты. В ходе исследования были определены условия, выполнение которых практически устраняет интерференцию при сохранении традиционной методики калибровки, т. е. калибровки непосредственно на разъёме измерительной системы. К таким условиям относится необходимая длина разделки:

$x < 12$ см для 5е-кабелей (1–100 МГц);

$x < 8$ см для 6А-кабелей (1–500 МГц);

$x < 4$ см для 7А-кабелей (1–1000 МГц), что практически

крайне затруднительно для традиционных подключающих устройств.

Заключение. Интерференция сигналов, отражённых от начала и окончания участка разделки, вызывает значимые изменения измеренных частотных характеристик затухания отражения и импеданса. Размах осцилляции измеренной частотной характеристики импеданса определяется удвоенным отклонением импеданса участка разделки от контролируемого импеданса собственно кабеля. Период осцилляции характеристики обратно пропорционален длине

участка разделки контролируемого кабеля. Увеличение измеренного значения импеданса с увеличением частоты не является монотонным процессом, а лишь проявлением осцилляции на начальном участке оси частот. Наиболее эффективная компенсация осцилляции измеренного импеданса при тестировании параметров в производственных условиях обеспечивается калибровкой ВАЦ комплектом распределённых нагрузок, который позволяет перенести плоскость калибровки на обрез оболочки контролируемого кабеля. Перенос плоскости калибровки приводит к практическому результату – уменьшению методической погрешности измерения импеданса с 14 до 3 % для 5е-кабелей. Комплект распределённых калибровочных нагрузок для однопортовой калибровки ВАЦ состоит из трёх отдельных элементов и может быть изготовлен непосредственно в производственной лаборатории кабельного завода или испытательного центра.

Список источников

1. Фролов И., Лушеникова Н. Новые российские медно-жильные кабели для СКС и сетей доступа // Первая миля. 2019. № 8. С. 26–29. <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2019.85.8.26.29>
2. Андреев В., Бульхин А., Попов Б., Попов В. Качество LAN-кабелей – основа надёжной работы СКС и сетей ШПД // Первая миля. 2020. № 1(86). С. 34–37. <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2020.86.1.34.37>
3. Семенов А. Б., Шолуденко М. В. Новый стандарт на симметричные кабели связи для цифровых систем передачи // Вестник связи. 2012. № 9. С. 43–45.
4. Мацкевич Д. Есть российский стандарт на СКС... // Журнал сетевых решений/LAN. 2010. № 1. С. 34–37.
5. Семенов А., Макуев А., Фомичев Б. Структурированные кабельные системы категории 8 // Первая миля. 2016. № 5(58). С. 58–62.
6. Кузнецов Р. Г., Лобанов А. В., Молчанов Н. Е. Особенности разработки и производства кабелей для стандарта SPACEWIRE // Кабели и провода. 2021. № 2. С. 10–24. https://doi.org/10.52350/2072215X_2021_2_10
7. Ван Рейссельберге Л., Кляйн В., Гигон Д., Дардел Б., Арбет-Энгельс В. Обзор процедур по устранению побочных

эффектов при измерении радиочастотных кабелей связи // Кабели и провода. 2021. № 2. С. 26–33.

https://doi.org/10.52350/2072215X_2021_2_26

8. Кочеров А., Семенов А., Руденко В. Электрические параметры LAN-кабелей: как нам реорганизовать контроль // Первая миля. 2021. № 7(99). С. 44–55.

<https://doi.org/10.22184/2070-8963.2021.99.7.44.55>

9. Гальперович Д. Я., Яшневу Ю. В. Высокоскоростные кабельные системы для компьютерных сетей. М.: Русская панорама, 1999. 128 с.

References

1. Frolov I., Lushenkova N., New russian copper core cables for SCS and access networks, *Last Mile*, 2019, no. 8, pp. 26–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2019.85.8.26.29>
2. Andreev V., Bulkhin A., Popov B., Popov V., Quality of LAN cables – the basis for reliable work of SCS and BBA networks, *Last Mile*, 2020, no. 1, pp. 34–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2020.86.1.34.37>
3. Semenov A., Sholudenko M., A new standard for twisted pair communication cables for digital transmission systems, *Vestnik svyazy*, 2012, no. 9, pp. 43–45. (In Russ.)
4. Mastkevich D., There is a russian SCS standard..., *LAN network solutions magazine*, 2010, no 1, pp. 34–37. (In Russ.)
5. Semenov A., Makuev A., Fomichev B., Category 8 structured cabling system, *Last Mile*, 2016, no. 5, pp. 58–62. (In Russ.)
6. Kuznetsov R., Lobanov A., Molchanov N. *Cables and wires*, 2021, no. 2, pp. 10–24. (In Russ.)
7. Van Rysselberghe L., Klein W., Gigon D. et al., Review of procedures to overcome spurious effects in the measurement of RF communication cables, *Cables and wires*, 2021, no 2, pp. 26–33. (In Russ.) https://doi.org/10.52350/2072215X_2021_2_26
8. Kocherov A., Semenov A., Rudenko V., Electrical parameters of lan-cables: how we should reorganise control, *Last Mile*, 2021, № 7, pp. 44–55. (In Russ.)
9. Galperovich D. Ya., Yashnev Yu. V., *Vysokoskorostnye kabelnye sistemy dlya komputernykh setej [High-speed cable systems for computer networks]*, Moscow, Russkaja panorama Publ., 1999, 128 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 21.02.2022; одобрена после рецензирования 20.06.2022; принята к публикации 04.07.2022.
The article was submitted 21.02.2022; approved after reviewing 20.06.2022; accepted for publication 04.07.2022.