ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ФИДЕРНЫХ ЛИНИЙ НА СОГЛАСОВАНИЕ В АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВАХ

В.Е. Митрохин¹, Н.Е. Агарков²

¹Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Российская Федерация

²Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

Рассматриваются параметры изоляции фидерных линий, применяемых в антенно-фидерных устройствах. Основное внимание уделяется таким параметрам, как величина относительной диэлектрической проницаемости изоляции фидерных линий в широком спектре частот, а также волновое сопротивление фидерных линий при различных условиях их работы. Обсуждаются вопросы согласования фидеров с антеннами и передатчиками по волновому сопротивлению. Предлагается измерение величины диэлектрической проницаемости изоляции кабелей на этапе проектирования антенно-фидерных устройств для оценки качества согласования фидеров с антеннами, трансформаторами сопротивлений и другими устройствами с помощью установки, разрабатываемой авторами. Приводятся результаты измерений диэлектрической проницаемости образцов радиочастотных кабелей РК-75-4-12, РК-75-4-21, а также стеклотекстолита FR-4 в широком диапазоне частот.

Ключевые слова: фидер, линия передачи, антенно-фидерные устройства, диэлектрик, параметры изоляции, волновое сопротивление фидера, диэлектрическая проницаемость, высокая частота, спектр частот, КСВ.

INFLUENCE OF FEEDER LINES INSULATION PARAMETERS ON MATCHING IN ANTENNA-FEEDER DEVICES

V.E. Mitrokhin¹, N.E. Agarkov²

¹Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

The article discusses the isolation parameters of feeder lines used in antenna-feeder devices. Focuses on such parameters as the magnitude of the relative permittivity of the insulation feeder lines in a wide range of frequencies, and the impedance of the feeder lines under various conditions of their work. The issues of matching feeders with antennas and transmitters in terms of impedance are discussed. It is proposed to measure the dielectric constant of cable insulation at the design stage of antenna-feeder devices to assess the quality of matching feeders with antennas, resistance transformers, and other devices using the installation developed by the authors of the article. The results of measurements of the dielectric constant of samples of radio-frequency cables RC-75-4-12, RC-75-4-21, as well as fiberglass FR-4 in a wide frequency range are presented.

Keywords: feeder, transmission line, antenna-feeder devices, dielectric, insulation parameters, feeder wave impedance, dielectric constant, high frequency, frequency spectrum, SWR.

В антенной технике всегда рассматривается вопрос о том, как довести сигнал от передатчика до антенны или от антенны до приемника, не потеряв в мощности, и обеспечить между этими устройствами необходимый уровень согласования [1]. В подавляющем большинстве случаев антенна подключается к приемопередающей аппаратуре через фидерную линию передачи, которая характеризуется волновым сопротивлением Z_0 и КПД. В свою очередь, волновое сопротивление фидера непосредственно влияет на его согласование и с антенной, и с приемопередающей аппаратурой, обусловленное уровнем КСВ в линии.

Волновое сопротивление фидеров, начиная с килогерцового диапазона, определяется по упрощенной формуле для линий передачи как квадратный корень отношения погонной индуктивности к погонной емкости [2]. Индуктивность фидера определяется геометрическими размерами проводников. Емкость же зависит как от формы и размеров проводников линии и расстояния между ними, так и от материала изолятора, заполняющего пространство между проводниками и характеризующегося величиной относительной диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенсом угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$). В качестве изолятора может быть: воздух (в случае двухпроводной симметричной линии или коаксиального кабеля с воздушной внутренней изоляцией), полиэтилен, фторопласт, поливинилхлорид и другие изоляционные материалы, качество и характеристики которых зависят от химического состава и цены изделия. Особое место в линиях передачи занимают микрополосковые линии, выполненные на подложках печатных плат, соединяющие через коаксиальный разъем фидер, подключаемый к антенне, и микрополосковую линию, располагающуюся от разъема до схемы, например АнСУ. Таким образом, волновое сопротивление фидеров зависит от величины ϵ применяемых в их конструкции изоляционных материалов, которая может отличаться от указанных в паспорте на продукцию с ростом частоты, влажности, температуры и других внешних факторов, особенно в УКВ диапазоне, приводя к рассогласованию приемопередающей аппаратуры и антенны, потерям мощности в фидере. Диэлектрическая проницаемость также влияет и на коэффициент укорочения в фидерах. Актуальность проблемы определяется и тем, что в настоящее время наблюдается интенсивное расширение спектра передаваемых частот в область сотен и тысяч мегагерц, поэтому разработчикам радиоэлектронной аппаратуры требуется знание возможностей применения используемых на практике фидерных линий.

Методы расчета волновых сопротивлений фидерных линий различных типов на основе их геометрических размеров и величины ϵ подробно описаны в литературе [3].

Двухпроводная симметричная линия с воздушной изоляцией, показанная на рис. 1а [4], наиболее подвержена изменению волнового сопротивления из-за погодных условий – дождя, снега, тумана. Так как диэлектрическая проницаемость воды в КВ и МВ диапазонах в 80 раз больше воздуха, весьма малое ее присутствие в объеме поля, образованного двумя параллельными проводниками, значительно повышает емкость линии и диэлектрические потери, уменьшая при этом волновое сопротивление фидера, которое для двухпроводной симметричной линии рассчитывается по следующей формуле [3]:

$$Z_0 = \frac{119,904}{\sqrt{\epsilon}} \ln\left(\frac{2e}{d} + \sqrt{\left(\frac{2e}{d}\right)^2 - 1}\right), \quad (1)$$

где e – расстояние между центрами проводников, м; d – диаметр проводников, м.

Например, присутствие 1,5 % воды в объеме воздуха при дожде [5] приводит к увеличению емкости фидера в 2,2 раза и, соответственно, к уменьшению волнового сопротивления примерно в 1,5 раза, что ухудшит КСВ фидера в 1,5 раза и понизит его КПД. Оценить величину КПД фидера при неполном согласовании можно согласно [1]. На рис. 1б показана двухпроводная симметричная линия в изоляции, на поверхности которой находятся капли воды. Для неизменности электрических параметров применяют экранированные симметричные двухпроводные линии.

В коаксиальных кабелях, широко применяющихся в КВ и УКВ диапазонах, поле сосредоточено в диэлектрике между центральной жилой и оплеткой, что при герметичности данных кабелей исключает влияние влаги на изменение емкости фидера, однако остается открытым вопрос о характере поведения диэлектрической проницаемости внутреннего диэлектрика и тангенса потерь в широком диапазоне частот, а также при изменении температуры фидера. Волновое сопротивление коаксиальной линии рассчитывается по следующей формуле [3]:

$$Z_0 = \frac{59,952}{\sqrt{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{d}\right), \quad (2)$$

где b – внутренний диаметр оплетки, м; d – диаметр центральной жилы, м.

Рис. 1. Поле двухпроводной симметричной линии

Современные печатные платы на основе стеклотекстолита уменьшают свою диэлектрическую проницаемость с ростом частоты. Характер и величина изменения зависит от химического состава стеклотекстолита. Например, самый распространенный материал для печатных плат – FR-4, согласно [6], имеет большой разброс значений ϵ на частоте 1 МГц от 4,5 до 5,4 ед. и ярко выраженную зависимость от частоты [7]. Специализированный материал Rogers RF35 на основе СВЧ-ламината имеет ϵ 3,5, которая слабо зависит от частоты, что позволяет применять его и на низких, и на высоких частотах в единицы ГГц [8, 9]. Волновое сопротивление микрополосковой линии, расположенной на подложке печатной платы, определяется для случая, когда ее ширина W меньше или равна толщине подложки h по следующему выражению [3].

$$Z_0 = \frac{59,952}{\sqrt{\epsilon}} \ln\left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h}\right). \quad (3)$$

Таким образом, величины ϵ и $\text{tg} \delta$ зависят, во-первых, от материала и его химического состава, во-вторых, от технологии производства и от партии к партии (в меньшей степени), в-третьих, от частоты передаваемого сигнала, в-четвертых, от внешних физических условий среды. Поэтому авторами статьи разрабатывается установка для определения величины ϵ изоляции кабелей и подложек печатных плат в широком диапазоне частот.

Схема установки показана на рис. 2. Установка имеет два коаксиальных входа XP_1 и XP_2 , переключаемых шестиконтактным тумблером SA типа On-On. Резистор R_2 является согласующим по входному сопротивлению с генераторным оборудованием G , имеющим выходное сопротивление Z_g . Принцип работы установки основан на усовершенствованном конденсаторном методе с использованием паразитного высокочастотного последовательного низкодобротного резонанса как полезного явления, а не ограничивающего фактора из-за проявления паразитной индуктивности $L_{\text{пар}}$ дорожек печатной платы установки на частотах более 10 МГц. Резистор R_1 является измерительным, задающим ток в последовательной RC-цепи, образованной им совместно с подключаемым образцом для измерения емкостью C . Индуктивности $L_{\text{согл}}$ и $L_{\text{изм}}$ образованы дорожками печатной платы и собственными индуктивностями резисторов. Активное сопротивление R_a проявляется при последовательном LC-резонансе, когда падение напряжения на образце не обращается полностью в ноль. Для проведения измерений на генераторе синусоидальных сигналов выставляется необходимая частота, затем к генератору поочередно подключаются коаксиальные входы установки, позволяющие с помощью высокочастотного цифрового осциллографа PV_1 снять напряжение на одном из двух элементов – резисторе или конденсаторе. По измеренным значениям падения напряжения на элементах на каждой частоте вычисляется сопротивление образца конденсатора и по известным геометрическим размерам, например для плоского или цилиндрического конденсатора вычисляется величина ϵ изоляции. На высоких частотах в десятки мегагерц в формулу сопротивления образца вводится значение паразитной индуктивности. После прохождения резонанса на частотах 40–60 МГц, в зависимости от емкости получаемых

[illegible]

Конденсаторный метод и его ограничения подробно описаны в работах [10; 11]. На данной установке проводились измерения диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 10 Гц – 115 МГц фольгированного стеклотекстолита FR-4, а также радиочастотных кабелей РК-75-4-12 с полиэтиленовой изоляцией и РК-75-4-21 с тефлоновой изоляцией, характеристики которых сведены в табл. 1.

Параметр	PK-75-4-12	PK-75-4-21
Диаметр жилы, мм	0,78	0,85
Диаметр по изоляции жилы, мм	4,6	4,6
Диаметр оплетки, мм	0,12	0,12
Внешний диаметр, мм	7	5,9
Материал жилы	Медь	Посеребренная медь
Материал внешней изоляции	Светостабилизированный полиэтилен	Стекловолокно, пропитанное кремнийорганическим лаком
Волновое сопротивление кабеля, Ом	75±2	75±3
Погонная емкость, пФ/м	67	63
Диэлектрик вокруг жилы	Полиэтилен	Тефлон (Ф-4)
Справочная диэлектрическая проницаемость изоляции, ед.	1,9–2,4	1,9–2,2
Коэффициент укорочения, ед.	1,52	1,41

График зависимости диэлектрической проницаемости от частоты тефлоновой изоляции радиочастотного кабеля РК-75-4-21, полученный с помощью разрабатываемой установки в спектре частот 0,1–115 МГц, приведем на рис. 3. Экспериментальные данные получены на поверенном и аттестованном оборудовании. В качестве генераторов сигналов использовались ГЗ-112, R&S SMB100A. В качестве измерителя напряжения использовались осциллографы АКТАКОМ ADS-2221mV (РК-75-4-12), а также Tektronix MSO-2024 (FR-4 и РК-75-4-21) с шириной полосы пропускания 200 МГц.

Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости изоляции РК-75-4-21 от частоты

Величина ϵ тефлона до 1 ГГц не зависит от частоты, находится в пределах 1,9–2,2 ед. из-за различного химического состава, но имеет температурную зависимость и с ростом температуры нелинейно уменьшается. Погрешность установки в диапазоне частот до 80 МГц не превосходит 5 %, до 115 МГц – 10 %. Она связана прежде всего с проявлением дополнительных паразитных элементов на частотах более 50 МГц, учет которых в полной мере является весьма трудной задачей, а также с погрешностью измерения величины напряжения на элементах.

Исходя из экспериментальных данных, рассчитаем величину коэффициента укорочения, значение волнового сопротивления, а также вычислим погонную емкость образца, воспользовавшись формулой для цилиндрического конденсатора [12]. Результаты сведем в табл. 2. Справочные геометрические характеристики кабелей приведены в табл. 1.

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (4)$$

где C – емкость конденсатора, Ф; l – длина образца, м; r_2 – радиус диэлектрика, мм; r_1 – радиус центральной жилы, мм.

Далее был измерен образец радиочастотного кабеля РК-75-4-12 [13], график зависимости ϵ которого представлен на рис. 4. Цифрами обозначены разные измерительные резисторы установки, подобранные так, чтобы на самой низкой частоте можно было четко зафиксировать падение напряжения на нем, когда измеряемый образец обладает очень высоким импедансом. Цифра 1 – резистор 1 МОм, 2 – 100 кОм, 3 – 270 Ом.

На основе полученного среднего значения диэлектрической проницаемости в 2,3 ед. рассчитаем коэффициент укорочения, погонную емкость и волновое сопротивление кабеля РК-75-4-12. Результаты также сведем в табл. 2.

Погрешность измерения величины ϵ в диапазоне частот 20–30 МГц (рис. 4) превышает 10%, что, возможно, связано с применявшимся для измерений осциллографом ADS-2221mV, который не относится к классу профессионального оборудования.

Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости изоляции РК-75-4-12 от частоты

Таблица 2

Экспериментальные и справочные характеристики кабелей

Параметр	РК-75-4-12		РК-75-4-21	
	Эксперимент	ГОСТ	Эксперимент	ГОСТ
Коэффициент укорочения, ед.	1,52	1,52	1,45	1,41
Погонная емкость, пФ/м	71	67	69	63
Волновое сопротивление, Ом	71,2	75±2	69,9	75±3

Из табл. 2 следует, что на практике характеристики данных кабелей несколько отличаются от паспортных. Особенно важно это отличие по волновому сопротивлению от номинала, которое приведет к неполному согласованию фидерной линии с антенной и приемопередающей аппаратурой.

На рис. 5 покажем зависимость диэлектрической проницаемости круглого образца двухстороннего фольгированного стеклотекстолита FR-4 от частоты.

Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости стеклотекстолита FR-4 от частоты

Рис. 5 показывает, что диэлектрическая проницаемость FR-4 с частот в десятки герц до ста килогерц находится на уровне 5,2 ед., а с дальнейшим повышением частоты начинает снижаться, и на частоте 100 МГц составляет уже 4,7 ед. Как показывают другие эксперименты [7], на частотах в сотни мегагерц величина ϵ стеклотекстолита продолжает снижаться такими же темпами, что понижает волновое сопротивление фидерных линий, основанных на подложках печатных плат на 10 и более процентов, в зависимости от качества стеклотекстолита.

В заключение отметим, что качественное согласование фидерных линий с антеннами и приемопередающей аппаратурой в широком спектре частот, особенно, в УКВ диапазоне, невозможно без знания электрических характеристик применяемых изоляционных материалов в фидерных линиях. Рассмотренные в данной статье примеры подтверждают это. Необходимость учета параметров изоляции при проектировании антенно-фидерных

устройств подтверждается и растущим с каждым годом спектром передаваемых частот. Проектируемая авторами установка для определения параметров изоляции фидеров от частоты может применяться и для изучения их свойств от изменения температуры, что является одним из важнейших факторов при эксплуатации антенно-фидерных устройств в изменяющихся климатических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мешалкин В. А., Сосунов Б.В., Филиппов В.В. Поля и волны в задачах разведзащищенности и радиоэлектронной защиты систем связи. СПб.: ВАС, 1993. С. 87–90.
2. Линии связи: учебник для вузов / под ред. И.И. Гроднева, С.М. Верника. 5-е изд., пер. и доп. М.: Радио и связь, 1988, С. 120.
3. Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ / М.А. Р. Ганстон; пер. с англ. под ред. А.З. Фрадина. М.: Связь, 1976. С. 26–27, 57–58.
4. Беньковский З., Липинский Э. Любительские антенны коротких и ультракоротких волн. М.: Радио и связь, 1983. С. 33.
5. Клинский Б.М., Кудрявцев А.В. Обоснование требований по величине весовой концентрации и дисперсности капель воды при проектировании стендовой установки для имитации попадания дождя // Двигатель. 2012. №3. С. 10–14.
6. ГОСТ 26246.5-89. Материал электроизоляционный фольгированный нормированной горючести для печатных плат на основе стеклоткани, пропитанной эпоксидным связующим. Технические условия. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200011703> (дата обращения: 03.09.2019).
7. Бобров П.П., Кривальцевич С.П. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости листовых диэлектриков в диапазоне частот от 3 кГц до 300 МГц // Техника радиосвязи. 2017. №3. С. 62–71.
8. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: Группа ИДТ, 2007. 616 с.
9. Косолапов А. Материалы фирм Taconic и Neltec для СВЧ-устройств // Компоненты и технологии. 2005. №7. С. 230–232.
10. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 406 с.
11. Основы диэлектрической спектроскопии: учебное пособие / под ред. Ю.А. Гусева Казань, 2008. 112 с.
12. Справочник по физике / Х. Кухлинг; пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. М.: Мир. 1985. 520 с.
13. ГОСТ 11326.9-79. Кабель радиочастотный марки РК 75-4-12. Технические условия. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200012021> (дата обращения: 03.09.2019).
14. ГОСТ 11326.42-79. Кабель радиочастотный марки РК 75-4-21. Технические условия. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200012063> (дата обращения: 03.09.2019).