

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
Кафедра «Радиоэлектронные системы и технологии»

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СВЧ И АНТЕНН

Учебно-методическое пособие
к выполнению контрольной работы по дисциплине
для обучающихся заочной формы обучения направлений
11.04.01 «Радиотехника»
и 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Севастополь
СевГУ
2022

УДК 621.396.67:001.891.54(076.5)
ББК 32.845в6я73
М744

Р е ц е н з е н т :
И.Л. Афонин - д-р техн. наук, профессор

Ответственный за выпуск:
И. Л. Афонин - заведующий кафедрой «Радиоэлектронные системы
и технологии», д-р техн. наук, профессор

Составители: В.Г. Слёзкин, Г.В. Боков

М744 Моделирование устройств СВЧ и антенн : учебно-методическое
пособие к выполнению контрольной работы по дисциплине для
обучающихся заочной формы обучения направлений 11.04.01
"Радиотехника" и 11.04.02 "Инфокоммуникационные технологии и
системы связи" / Севастопольский государственный университет,
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности, кафедра
«Радиоэлектронные системы и технологии»; сост. В.Г. Слёзкин,
Г.В. Боков. – Севастополь : СевГУ, 2022. – 30 с. – Текст : электронный.

Учебно-методическое пособие подготовлено с целью оказания помощи
обучающимся заочной формы обучения при самостоятельном выполнении
контрольной работы. Пособие содержит требования к оформлению работы, расчётные
задания и задания по теоретическому материалу дисциплины.

УДК 621.396.67:001.891.54(076.5)
ББК 32.845в6я73

Учебно-методическое пособие рассмотрено и утверждено на заседании ка-
федры «Радиоэлектронные системы и технологии» ИРИБ СевГУ, протокол № 9
от 26 мая 2022 г.

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию на
заседании учёного Совета Института радиоэлектроники и информационной
безопасности, протокол № 11 от 16 июня 2022 г.

© Слёзкин В.Г., Боков Г.В., сост., 2022
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Расчётный раздел задания	5
1.1. Анализ режимов работы фидеров	5
1.1.1. Особенности диапазона сверхвысоких частот.....	5
1.1.2. Падающие и отражённые волны в фидере	5
1.1.3. Характеристики режима работы фидера.....	7
1.1.4. Практические требования к передаче энергии фидером	9
1.1.5. Входное сопротивление отрезка фидера.....	10
1.1.6. Задание для самостоятельного выполнения.....	11
1.2. Исследование параметров фидеров.....	12
1.2.1. Двухпроводный фидер.....	12
1.2.2. Коаксиальный фидер.....	13
1.2.3. Микрополосковая линия.....	14
1.2.4. Задание для самостоятельного выполнения.....	15
1.3. Рекомендации к началу работы в САПР <i>CST MWS</i> и выполнению задания.....	16
1.3.1. Создание проекта	16
1.3.2. Задание начальных значений параметров.....	19
1.3.3. Разработка геометрии модели	20
1.3.4. Настройка параметров анализа и выполнение расчётов.....	24
1.3.5. Просмотр результатов расчёта входных характеристик.....	25
2. Теоретический раздел задания.....	27
Библиографический список.....	30

ВВЕДЕНИЕ

Целью контрольной работы является проверка готовности обучающихся к выполнению лабораторных работ и сдаче зачёта по дисциплине во время лабораторно-экзаменационной сессии.

Контрольная работа оформляется в соответствии требованиями, принятыми на кафедре РТ [1]. Форма титульного листа содержится в приложении А, а также в файле [2].

Содержание работы составляют два раздела: расчётный и теоретический.

Для выполнения контрольной работы необходимо следующее программное обеспечение:

- пакет математических программ *MathCAD* версий 14 или 15;
- пакет прикладных программ для моделирования устройств СВЧ и антенн *CST Microwave Studio*: бесплатную студенческую версию можно скачать по ссылке: https://software.3ds.com/web_support/CST/2021/GA/CST_S2_2021.SIMULIA_CST_SE.Windows64.zip.

При выполнении первого раздела следует выполнить два задания с помощью программ для среды *MathCAD*, прилагаемых к заданию на контрольную работу [3] и выполнить моделирование в среде *CST MWS*.

Отчётными материалами по первому разделу являются необходимые математические выкладки и скрин-шоты с экрана монитора, сопровождаемые краткими пояснениями.

Во втором разделе необходимо привести достаточно полные ответы на индивидуальный набор теоретических вопросов.

1. РАСЧЁТНЫЙ РАЗДЕЛ ЗАДАНИЯ

1.1. Анализ режимов работы фидеров

1.1.1. Особенности диапазона сверхвысоких частот

Как известно [5], скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света c : на практике её считают равной $3 \cdot 10^8$ м/с. При циклической частоте высокочастотного колебания f , порождающего волну, период повторения T равен

$$T = 1/f = 2\pi/\omega,$$

где ω — круговая частота.

Расстояние, которое волна пролетает за один период, называют **длиной волны** λ

$$\lambda = c \cdot T = c/f = 2\pi c/\omega.$$

При распространении волны, например, вдоль координаты x , фаза высокочастотного колебания φ запаздывает на 2π радиан или на 360° через расстояние, равное длине волны. В произвольной точке x запаздывание фазы составит

$$\varphi(x) = x/\lambda \cdot 2\pi \text{ радиан} = x/\lambda \cdot 360^\circ \text{ градусов.}$$

Для описания зависимости напряжённости электрического поля e и магнитного поля h от времени t и расстояния x применяют метод комплексных амплитуд

$$e(t, x) = E(x) \exp(j\omega t);$$

$$h(t, x) = H(x) \exp(j\omega t),$$

где $E(x)$, $H(x)$ — комплексные амплитуды;

j — мнимая единица.

Суть метода состоит в том, что временной множитель опускается, а во все соотношения входят только комплексные амплитуды, учитывающие амплитудные и фазовые соотношения. При необходимости от комплексных амплитуд легко перейти к реальным колебаниям, выделив только действительную или только мнимую части.

Задачи передачи, излучения и приёма электромагнитных волн относят к диапазону **сверхвысоких частот (СВЧ)**, если геометрические размеры соответствующих устройств сравнимы с длиной волны.

1.1.2. Падающие и отражённые волны в фидере

Фидером или линией передачи («длинной» линией) называют устройство, направляющее электромагнитную волну вдоль своей продольной оси.

Для рассмотрения режимов работы отрезка фидера любого типа длиной l с волновым сопротивлением ρ_F , нагруженного на комплексную нагрузку Z , используют эквивалентную схему в виде отрезка двухпроводной линии (два параллельных проводника одинакового диаметра). Предполагается, что нагрузка Z является **точечной** (имеет нулевую длину) и расположена в сечении одного конца фидера, а генератор СВЧ колебаний на частоте ω лс ЭДС E и чисто активным внутренним сопротивлением R_i , равным ρ_F , подключён ко второму концу рассматриваемого отрезка. Продольную координату x принято отсчитывать от **плоскости нагрузки**, тогда генератору соответствует сечение $x = l$ (рис. 1.1).

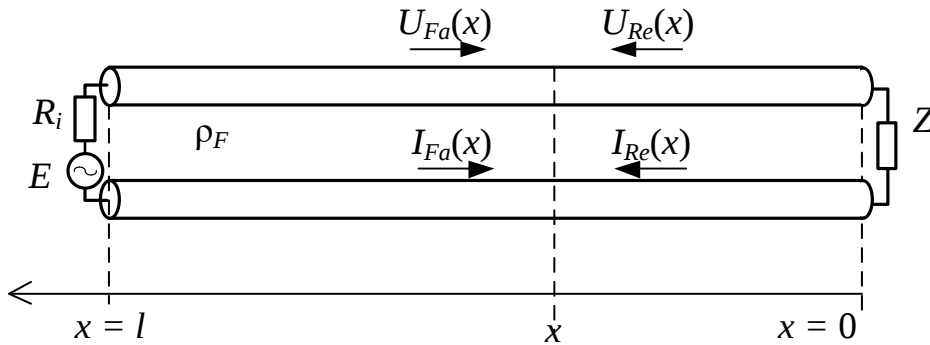


Рис. 1.1 — Эквивалентная схема отрезка фидера

Генератор порождает **падающую** электромагнитную волну, которую фидер направляет в сторону нагрузки.

Отношение амплитуды напряжённости электрического поля падающей волны $E_{Fa}(x)$ к амплитуде напряжённости магнитного поля $H_{Fa}(x)$ определяется самой **формой** поперечного сечения фидера: в этом заключается физический смысл волнового сопротивления фидера ρ_F [5].

Волновое сопротивление фидера определяется **формой** поперечного сечения фидера: это **отношение** амплитуды напряжённости электрического поля падающей волны к амплитуде напряжённости магнитного в омах.

Важно понимать, что волновое сопротивление — это просто размерный коэффициент, не имеющий прямого отношения к преобразованию энергии электромагнитной волны.

Эквивалентный фидер содержит два проводника, поэтому электромагнитная волна проявляется в виде падающих волн **напряжения** $U_{Fa}(x)$ и **тока** $I_{Fa}(x)$ (см. рис. 1.1), отношение амплитуд которых также равно волновому сопротивлению

$$\rho_F = \left| \frac{E_{Fa}(x)}{H_{Fa}(x)} \right| = \left| \frac{U_{Fa}(x)}{I_{Fa}(x)} \right|. \quad (1.1)$$

Если нагрузка — чисто активная и равна волновому сопротивлению фидера, то в точке подключения нагрузки отношение напряжения к току **не изменяется**:

вся энергия волны уходит из фидера в нагрузку. Во всех других случаях часть энергии отражается в сторону генератора, порождая **отражённые волны** напряжения $U_{Re}(x)$ и тока $I_{Re}(x)$ (см. рис. 1.1).

Разность фаз между напряжением и током падающей волны постоянна и равна $\pi/2$ или 90° : в тот момент, когда напряжение имеет максимальное значение, ток минимален, и наоборот, поэтому зависимости падающих волн от координаты x можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned} U_{Fa}(x) &= U_0 e^{j\gamma(x-l)} = U_0 e^{\alpha(x-l) + j\beta(x-l)}; \\ I_{Fa}(x) &= \frac{U_0}{\rho_F} e^{j\gamma(x-l) - j\frac{\pi}{2}} = \frac{U_0}{\rho_F} e^{\alpha(x-l) + j\beta(x-l) - j\frac{\pi}{2}}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где U_0 — напряжение на входе фидера.

Величина γ называется **постоянной распространения**

$$\gamma = \beta - j\alpha.$$

Составляющая β определяет изменение фазы и обычно называется **фазовой постоянной** или **волновым числом**, а составляющая α характеризует затухание волны и называется **коэффициентом затухания**.

В рамках данного практикума рассматриваются фидеры без потерь: предполагается, что отрезки фидеров в устройствах СВЧ имеют малую длину и коэффициент затухания α можно принять равным нулю. Для волнового числа при этом обычно используют обозначение k . По определению длины волны волновое число выражается соотношением

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_F},$$

где λ_F — длина волны в фидере (может отличаться от длины волны в свободном пространстве).

Отражённые волны напряжения и тока распространяются от нагрузки в сторону генератора. При отсутствии потерь в фидере их амплитуды постоянны, изменяются только фазы

$$\begin{aligned} U_{Re}(x) &= U_{R0} e^{-jkx}; \\ I_{Re}(x) &= \frac{U_{R0}}{\rho_F} e^{-jkx - j\frac{\pi}{2}}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где U_{R0} — комплексная амплитуда отражённой волны в сечении нагрузки.

1.1.3. Характеристики режима работы фидера

Так как отражённые волны порождаются падающими волнами, для характеристики режима работы фидера используют **коэффициент отражения по напряжению** $\Gamma(x)$

$$\Gamma(x) = \frac{U_{Re}(x)}{U_{Fa}(x)} = \Gamma_0 e^{j\varphi_0 - j2kx}, \quad (1.4)$$

где Γ_0, φ_0 — модуль и фаза коэффициента отражения в сечении нагрузки.

Примечание. При анализе $2m$ -полюсников (m — номер входа) используют волновые S -параметры, среди которых S_{ii} являются коэффициентами отражения от i -го входа ($i = 1, 2 \dots m$). Антенна является двухполюсником, поэтому вместо обозначения $\Gamma(x)$ может применяться обозначение S_{11} .

Из (1.4) следует, что в каждом сечении фидера **модуль** коэффициента отражения **не меняется**, а фаза изменяется по линейному закону.

Используя закон Ома и соотношения (1.3) в сечении нагрузки, можно получить выражение

$$\Gamma(0) = \frac{Z - \rho_F}{Z + \rho_F}. \quad (1.5)$$

Коэффициент отражения равен нулю, если сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению фидера.

При этом вся энергия передаётся фидером в нагрузку: говорят, что нагрузка полностью **согласована** с фидером. Из-за отсутствия отражённой волны режим работы фидера называют режимом **бегущей волны**.

Наоборот, энергия из фидера не уходит, а полностью отражается к генератору, если модуль коэффициента отражения равен единице: реализуется режим **стоячей волны**. Из (1.5) следует, что полное отражение происходит для следующих видов нагрузки:

- короткое замыкание ($Z = 0$);
- холостой ход ($Z \rightarrow \infty$);
- чисто реактивная ($Z = \pm jX$).

Промежуточные случаи соответствуют режиму **смешанных волн** при различном уровне согласования нагрузки с фидером.

Так как падающая и отражённая волны распространяются в противоположных направлениях, фаза коэффициента отражения изменяется на 360° на протяжении **половины длины волны**, т.е. картина волн в фидере повторяется через каждые $\lambda_F/2$.

Полная фаза коэффициента отражения (1.4) становится равной нулю в сечениях $x_{\max N}$, удовлетворяющих условию

$$\varphi_0 - jkx_{\max N} = 2\pi N, \quad (1.6)$$

где $N = 0, 1, 2 \dots$

В сечениях $x_{\max N}$ к падающей волне с единичной относительной амплитудой полностью добавляется отражённая волна с амплитудой Γ_0 , т.е. суммарные амплитуды напряжения достигают **максимальных** значений, которые принято называть **пучностями**.

Сечения $x_{\min N}$, в которых наблюдаются **минимумы** или **узлы** амплитуды, соответствует противоположным значениям фазы коэффициента отражения

$$\varphi_0 - jkx_{\min N} = \pi + 2\pi N. \quad (1.7)$$

Соседние пучности и соседние узлы отстоят друг от друга на величину $\lambda_F/2$. Для ближайших друг к другу пучности и узла изменение фазы составляет 180° , следовательно, расстояние между ними равно **четверти** длины волны $\lambda_F/4$.

Соотношение амплитуд напряжения в пучностях и узлах однозначно связано с модулем коэффициента отражения, поэтому его можно использовать для характеристики режима в фидере. В частности, **коэффициент стоячей волны** по напряжению (КСВН или *Voltage Standing Wave Ratio* — VSWR) k_{SW} определяется отношением максимальной амплитуды напряжения в линии к минимальной амплитуде

$$k_{SW} = \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}. \quad (1.8)$$

Противоположное отношение, редко применяемое в настоящее время, называют **коэффициентом бегущей волны** (КБВ) k_{RW}

$$k_{RW} = \frac{1 - \Gamma_0}{1 + \Gamma_0}. \quad (1.9)$$

Так как волны тока отличаются от волн напряжения только фазой, отдельные коэффициенты для тока не вводят, а вместо сокращения КСВН применяют аббревиатуру КСВ.

1.1.4. Практические требования к передаче энергии фидером

Относительная часть мощности сигнала, **не попадающая** в нагрузку, равна квадрату модуля коэффициента отражения, поэтому КПД передачи η энергии равен

$$\eta = 1 - \Gamma_0^2. \quad (1.10)$$

С учётом (1.8) из (1.10) можно выразить КПД через КСВ

$$\eta = \frac{4k_{SW}}{(1 + k_{SW})^2}. \quad (1.11)$$

Практические ограничения на рассогласование нагрузки с фидером (величину КСВ или модуля коэффициента отражения) определяются допустимыми потерями, а для передающих антенн — ещё и допустимым нарушением режима работы генератора.

1.1.5. Входное сопротивление отрезка фидера

Из соотношений (1.2, 1.3) и определения коэффициента отражения (1.4) следует, что распределения напряжений и токов вдоль фидера без потерь можно записать в виде

$$\begin{aligned} U(x) &= 1 + \Gamma(x); \\ I(x) &= 1 - \Gamma(x). \end{aligned} \quad (1.12)$$

Их отношение определяет **входное сопротивление** фидера $Z_{In}(x)$ в **произвольном сечении** x

$$Z_{In}(x) = \rho_F \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)}. \quad (1.13)$$

На практике удобно выражать связь этого сопротивления с сопротивлением нагрузки. С учётом (1.5) эта связь может быть записана в виде

$$Z_{In}(x) = \rho_F \frac{Z + j\rho_F \operatorname{tg}(kx)}{\rho_F + jZ \operatorname{tg}(kx)}. \quad (1.14)$$

Рассмотрим некоторые практически важные случаи (табл. 1.1).

Таблица 1.1 — Свойства нагруженных отрезков фидера

Условие	Выражение	Комментарий
$x = \lambda_F / 2$	$Z_{In}(\lambda_F / 2) = Z$	Входное сопротивление половолнового отрезка фидера равно сопротивлению нагрузки.
$x = \lambda_F / 4, Z = R$	$Z_{In}(\lambda_F / 4) = \frac{\rho_F^2}{R} = R_{In}$	При чисто активной нагрузке четвертьволновый отрезок трансформирует сопротивление, которое остаётся чисто активным.
$x = \lambda_F / 4, Z = jX$	$Z_{In}(\lambda_F / 4) = \frac{\rho_F^2}{jX} = -jX_{In}$	Четвертьволновый отрезок трансформирует величину реактивности и изменяет её знак на противоположный.
$Z = 0$	$Z_{In}(x) = j\rho_F \operatorname{tg}(kx)$	Входное сопротивление короткозамкнутого отрезка чисто реактивное, можно получить любую величину и любой знак. Отрезок длиной меньше четверти длины волны имеет индуктивный характер сопротивления.

Условие	Выражение	Комментарий
$x = \lambda_F/4, \quad Z = 0$	$Z_{In}\left(\lambda_F/4\right) \rightarrow \infty$	Входное сопротивление четвертьволнового короткозамкнутого отрезка соответствует холостому ходу .
$Z \rightarrow \infty$	$Z_{In}(x) = -j\rho_F \operatorname{ctg}(kx)$	Входное сопротивление короткозамкнутого отрезка чисто реактивное, можно получить любую величину и любой знак. Отрезок длиной меньше четверти длины волны имеет емкостной характер сопротивления.
$x = \lambda_F/4, \quad Z \rightarrow \infty$	$Z_{In}\left(\lambda_F/4\right) = 0$	Входное сопротивление четвертьволнового разомкнутого отрезка соответствует короткому замыканию .

1.1.6. Задание для самостоятельного выполнения

С помощью программы «Режим_фидера.xtcd» изучить основные понятия и соотношения, описывающие режим работы отрезка фидера на фиксированной частоте:

- коэффициент отражения;
- коэффициент стоячей волны (КСВ);
- зависимости КПД передачи энергии в нагрузку от КСВ и коэффициента отражения;
- предельные значения КСВ и коэффициента отражения (в натуральных единицах и в децибелах), при которых обеспечивается КПД передачи энергии не менее 0,9;
- положение максимумов и минимумов амплитуд напряжения при чисто активной нагрузке (большей и меньшей волнового сопротивления), при коротком замыкании и холостом ходе, при чисто реактивной нагрузке емкостного и индуктивного характера;
- свойства короткозамкнутого и разомкнутого отрезков фидера длиной четверть длины волны (режимы на входе отрезка);
- возможность реализации реактивности любого типа и любой величины короткозамкнутым и разомкнутым отрезками фидера.

1.2. Исследование параметров фидеров

1.2.1. Двухпроводный фидер

Волновое сопротивление двухпроводного фидера (в омах) выражается формулой [10]

$$\rho_F = 276 \lg \left(\frac{S_F}{d_F} + \sqrt{1 + \left(\frac{S_F}{d_F} \right)^2} \right), \quad (2.1)$$

где S_F — расстояние между центрами проводов,

d_F — диаметр провода.

При реализации СВЧ устройств на таких фидерах провода заключают в однослойные или двухслойные диэлектрические оболочки (рис. 2.1).

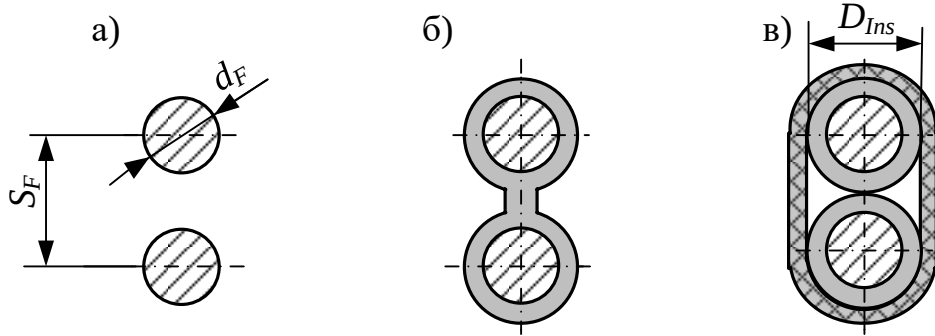


Рис. 2.1 — Геометрические параметры двухпроводного фидера (а) и примеры практической реализации (б, в)

При этом нужно учитывать диэлектрическую проницаемость материала изоляции проводников ϵ .

Так как изоляция не заполняет все пространство, вводится **эффективное** значение диэлектрической проницаемости ϵ_{ef} , которое значительно меньше, чем ϵ . Волновое сопротивление двухпроводного фидера с диэлектриком ρ_{FD} выражается формулой

$$\rho_{FD} = \frac{\rho_F}{\sqrt{\epsilon_{ef}}}. \quad (2.2)$$

Изменяются также длина волны и волновое число

$$\lambda_{FD} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{ef}}}; \quad (2.3)$$

$$k_{FD} = \sqrt{\epsilon_{ef}} k. \quad (2.4)$$

Для примера приведём параметры медного провода ВВП-1-2х2,5 [11]: это двухжильный провод с площадью сечения проводников 2,5 мм². Изоляция двойная (см. рис. 1.2 в) и выполнена из полихлорвинила (ПХВ) с диэлектрической проницаемостью ϵ около 3,5 [12].

Диаметр провода d_F равен 1,8 мм, диаметр по изоляции D_{Ins} составляет 3,2 мм.

Рассчитать величину ϵ_{Ef} практически невозможно, но для предварительных оценок можно взять половину величины ϵ .

1.2.2. Коаксиальный фидер

Коаксиальный фидер содержит внутренний проводник диаметром d_F , внешний проводник диаметром D_F (рис. 2.2).

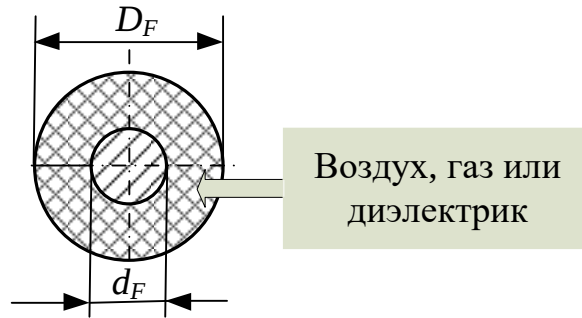


Рис. 2.2 — Сечение коаксиального фидера

В жёстких коаксиалах между проводниками находится воздух или специальный газ (например, «элегаз» имеет более высокую электрическую прочность). Гибкие кабели заполняются диэлектриком с малыми потерями, а внешний проводник выполняется из тонких проволок. Снаружи кабель обычно покрывают защитной оболочкой (на рис. 2.2 не показана).

Волновое сопротивление коаксиала (в омах) рассчитывается по формуле [10]

$$\rho_F = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \left(\frac{D_F}{d_F} \right) \quad (2.5)$$

Здесь под D_F понимается внутренний диаметр внешнего проводника, так как толщина его роли не играет.

Промышленность, в основном, выпускает кабели с полиэтиленовой ($\epsilon = 2,3$) и фторопластовой ($\epsilon = 2,0$) изоляцией. При сплошной изоляции в формулу (2.5) следует подставлять указанные значения, а если применен вспененный диэлектрик, то нужно использовать данные производителя (см., например, [11]).

Кабели обычно покрывают защитной оболочкой, но на электрические характеристики она не влияет.

Отечественные кабели имеют обозначения определённой структуры, например: РК50-7-16, где РК означает «Радиочастотный кабель», 50 — волновое сопротивление в омах, 7 — диаметр по изоляции в миллиметрах, 16 — номер разработки (табл. 2.1, рис. 2.3).

Таблица 2.1 — Параметры некоторых коаксиальных кабелей

Тип	Диэлектрик	d_F , мм	D_F , мм	α , дБ/м на частоте, ГГц	
				1	3
РК50-3-13	полиэтилен	0,9	3,0	0,65	1,3
РК75-3-13	полиэтилен	0,6	3,7	0,65	1,3
РК50-3-22	фторопласт	0,96	3,0	0,51	1,0
РК75-3-22	фторопласт	0,57	3,0	0,45	0,9

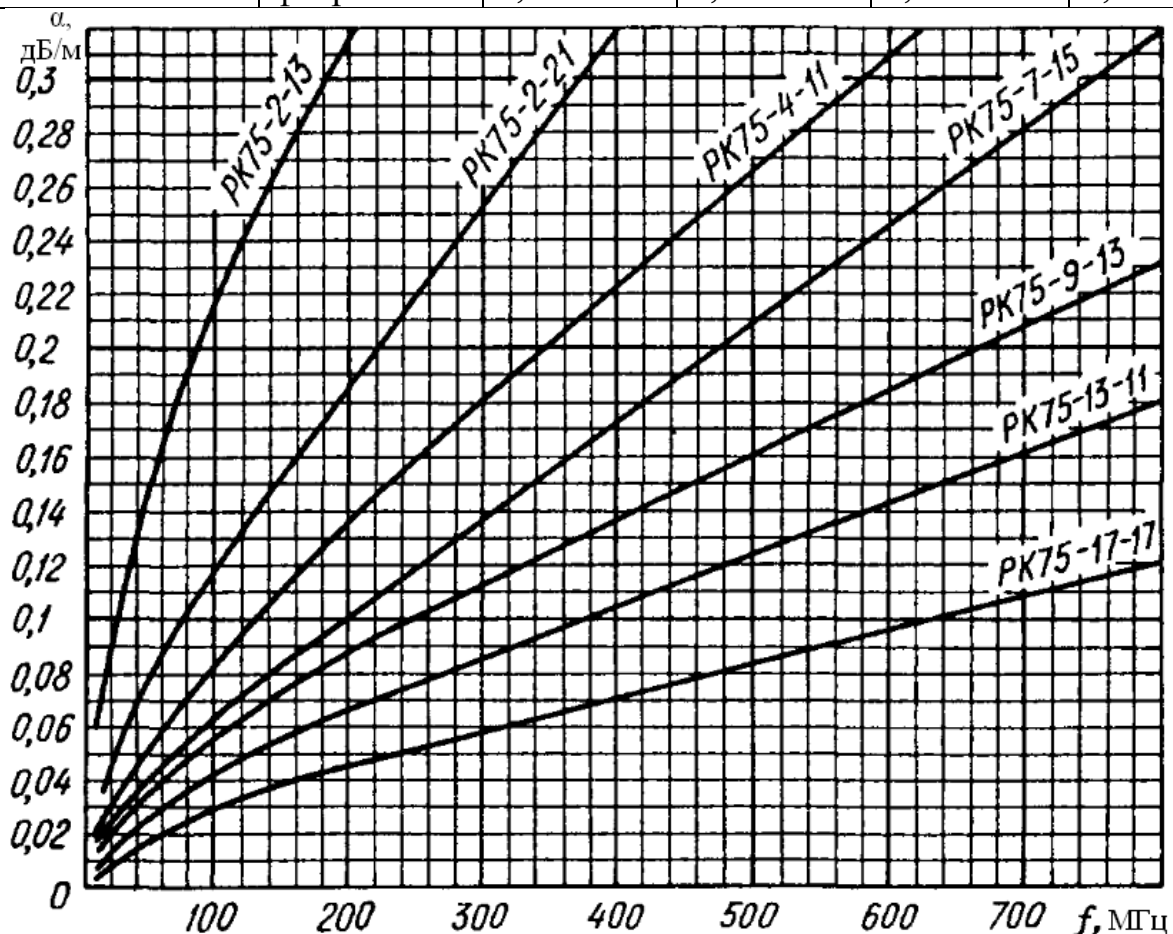


Рис. 2.3 — Частотные зависимости коэффициента затухания некоторых кабелей

1.2.3. Микрополосковая линия

Микрополосковая линия (МПЛ) содержит диэлектрическое основание толщиной S_F , снизу покрытое металлической (медной) фольгой и имеющее ширину, большую и равную величине a , и проводник из фольги шириной w и толщиной t (рис. 2.4).

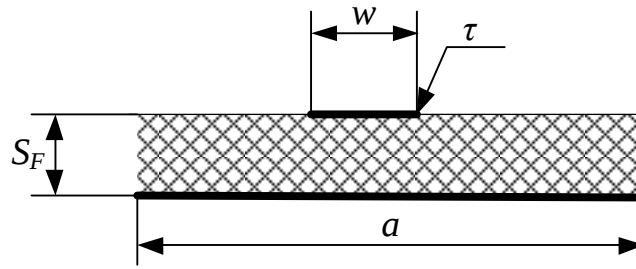


Рис. 2.4 — Сечение микрополосковой линии

Для расчёта волнового сопротивления МПЛ в [10] предлагается приближённая формула

$$\rho_F = \frac{173}{\sqrt{\varepsilon}} \lg \left(\frac{6S_F}{0,75w + \tau} + \frac{0,075w}{S_F} \right). \quad (2.6)$$

Эффективную диэлектрическую проницаемость приближённо можно найти по формуле

$$\varepsilon_{Ef} = \sqrt{0,48\varepsilon + 0,7}. \quad (2.7)$$

Минимальная ширина основания МПЛ составляет [6]

$$a = w + 4S_F. \quad (2.8)$$

Расчёт волнового сопротивления и эффективной диэлектрической проницаемости МПЛ обычно выполняют численно, с помощью специальных программ.

1.2.4. Задание для самостоятельного выполнения

1. С помощью программы *MathCAD* «Волновые_сопротивления.xmcd» определить два значения волнового сопротивления двухпроводного фидера: без диэлектрика ρ_F и с оболочками из ПХВ (ε около 3,5) ρ_{FD} . При выборе размеров предусмотреть возможность практической реализации фидера на основе провода ВВП-1-2х2,5 [11] при полном смыкании проводов по изоляции (см. рис. 2.1 в): диаметр каждого провода d_F равен 1,8 мм, диаметр по изоляции D_{Ins} составляет 3,2 мм.

2. С помощью программы «Частотные свойства.xmcd» для полученных значений волновых сопротивлений подобрать значения ёмкости и индуктивности последовательной нагрузки, при которых реактивные сопротивления близки к волновым, а резонанс наступает на средней частоте 600 МГц. Выполнить расчёты частотных зависимостей КСВ входа для трёх значений активной составляющей нагрузки, равных ρ_F , $\rho_F/2$, $2\rho_F$, в частотных пределах от 200 МГц до 1000 МГц.

3. Средствами программы *CST MWS* создать модель устройства на основе двухпроводного фидера без диэлектрика следующего вида:

- первый отрезок с расчётным волновым сопротивлением ρ_F длиной около длины волны на средней частоте λ_0 , расположенный вдоль оси z , в плоскости xOz ;

- второй отрезок длиной $\lambda_0/4$ с переменным волновым сопротивлением ρ_{FT} (начальное значение равно ρ_F), продолжающий первый отрезок;
- второй отрезок нагружен сосредоточенной нагрузкой последовательного типа «*Serial RLC*», активная часть которой R равна ρ_F , а ёмкость C и индуктивность L — расчётным значениям (см. п. 2 задания);
- первый отрезок возбуждается дискретным портом «*Discrete Port*».

Выполнить в заданной полосе частот следующие исследования:

- получить частотные зависимости КСВ входа для трёх значений R , равных ρ_F , $\rho_F/2$, $2\rho_F$;
- для двух значений R , не равных ρ_F , методом малых возмущений с шагом 5—10 % подобрать значение волнового сопротивления второго отрезка с целью получить максимально возможную полосу рабочих частот устройства по уровню КСВ 2,0;
- полученные результаты записать на диск в виде текстовых файлов, составить собственную программу для среды *MathCAD*, которая считывает данные из файлов и строит графики ранее полученных зависимостей (см. п. 2.2.2) и результатов анализа в среде *CST MWS*, включая два графика зависимостей полосы рабочих частот от волнового сопротивления второго отрезка фидера.

1.3. Рекомендации к началу работы в САПР *CST MWS* и выполнению задания

1.3.1. Создание проекта

Перед запуском программы *CST MWS* создайте на рабочем диске компьютера каталог для хранения своих проектов.

В имени каталога и во всех именах пути к нему должна применяться
только латиница!

Запустите программу *CST MWS* и создайте новый проект через шаблон (*Template*) для проволочных антенн (*Wire*). Для этого в исходном окне *File* выбираем *New template* → *MW & RF & Optical* → *Antennas* (рис. 2.5).

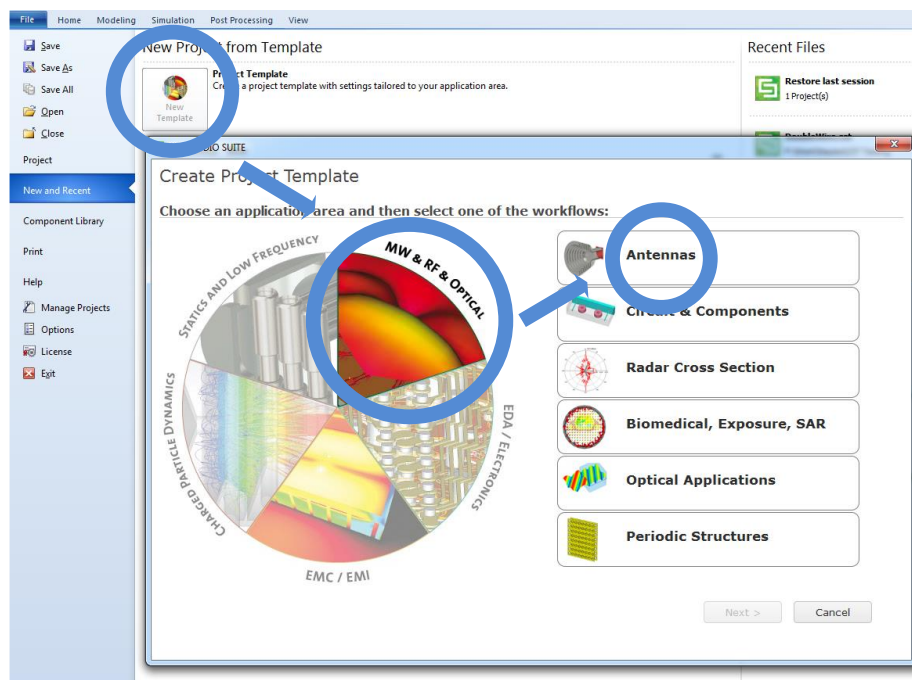


Рис. 2.5 — Начало создания шаблона

Для данного задания рекомендуется тип шаблона *Wire* (рис. 2.6), тип алгоритма решения — во временной области: *Time domain* (рис. 2.7).

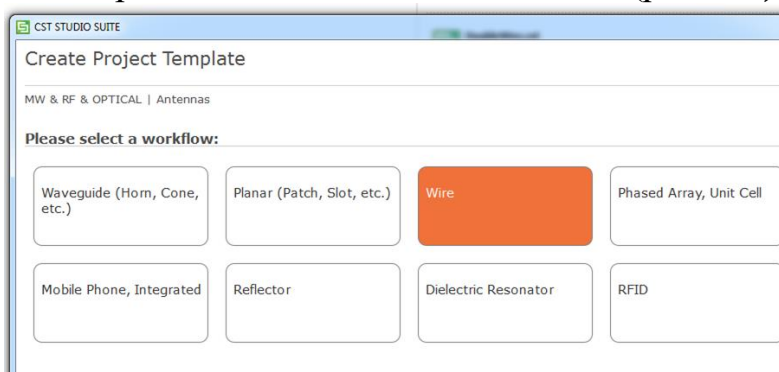


Рис. 2.6 — Выбор типа шаблона

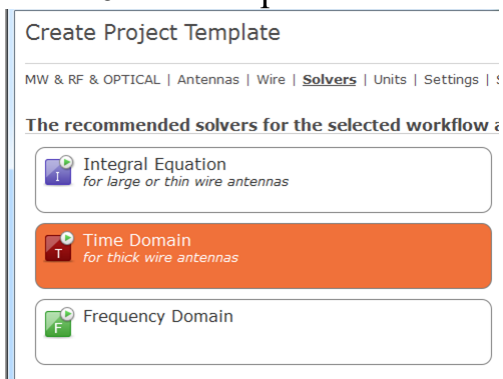


Рис. 2.7 — Выбор алгоритма

В окне единиц измерения (*Units*) для размеров удобно взять миллиметры, для частоты — мегагерцы (*MHz*), а остальные единицы можно использовать по умолчанию (рис. 2.8).

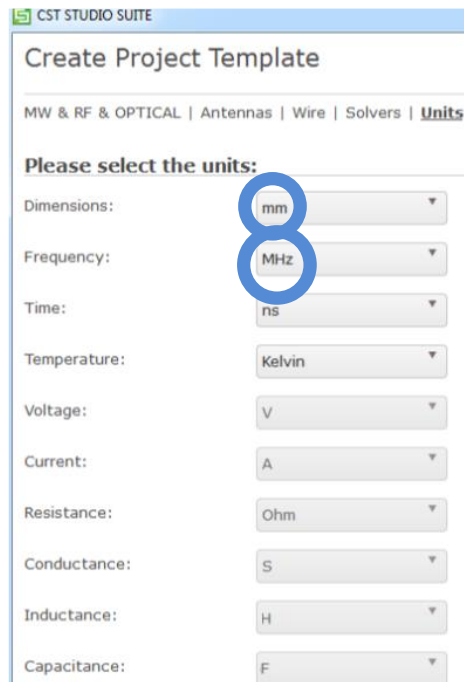


Рис. 2.8 — Установка единиц измерения

В окне частотных пределов устанавливаем *Frequency Min.*: 200 МГц, *Frequency Max.*: 1000 МГц, для визуализации результатов решения (*Monitor*) выбираем *E-field* на средней частоте 600 МГц (рис. 2.9).

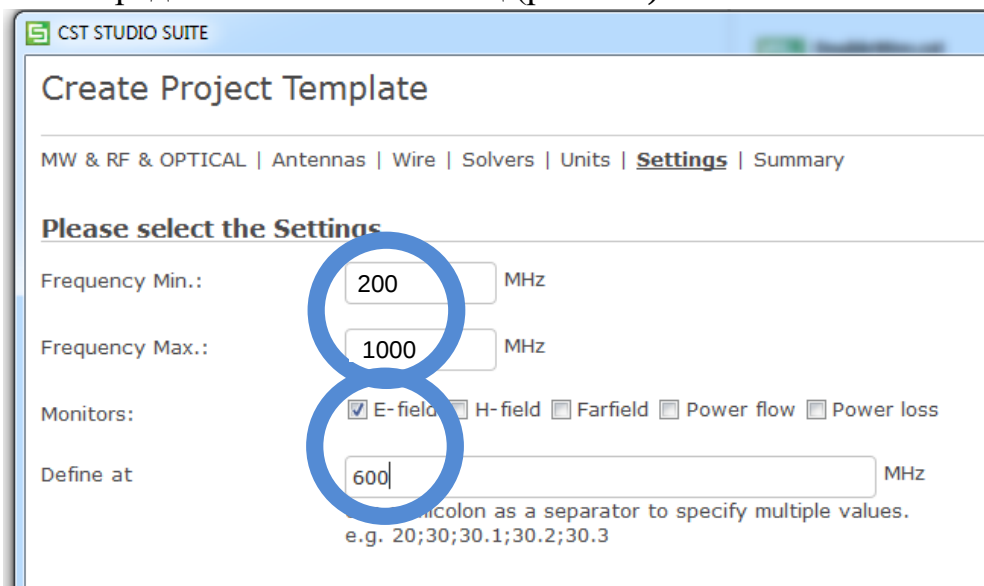


Рис. 2.9 — Установка частотных пределов и типа визуализации

После перехода к экрану просмотра результатов (*Summary*) проверяем наши установки и нажимаем *Finish*: откроется окна безымянного проекта *Untitled_0* в разделе *Home*. Рекомендуется сразу вызвать на экран список выполненных действий, который в *CST* называется *History List*, чтобы убедиться: проект создан на основе шаблона *Antenna-Wire* (рис. 2.10).

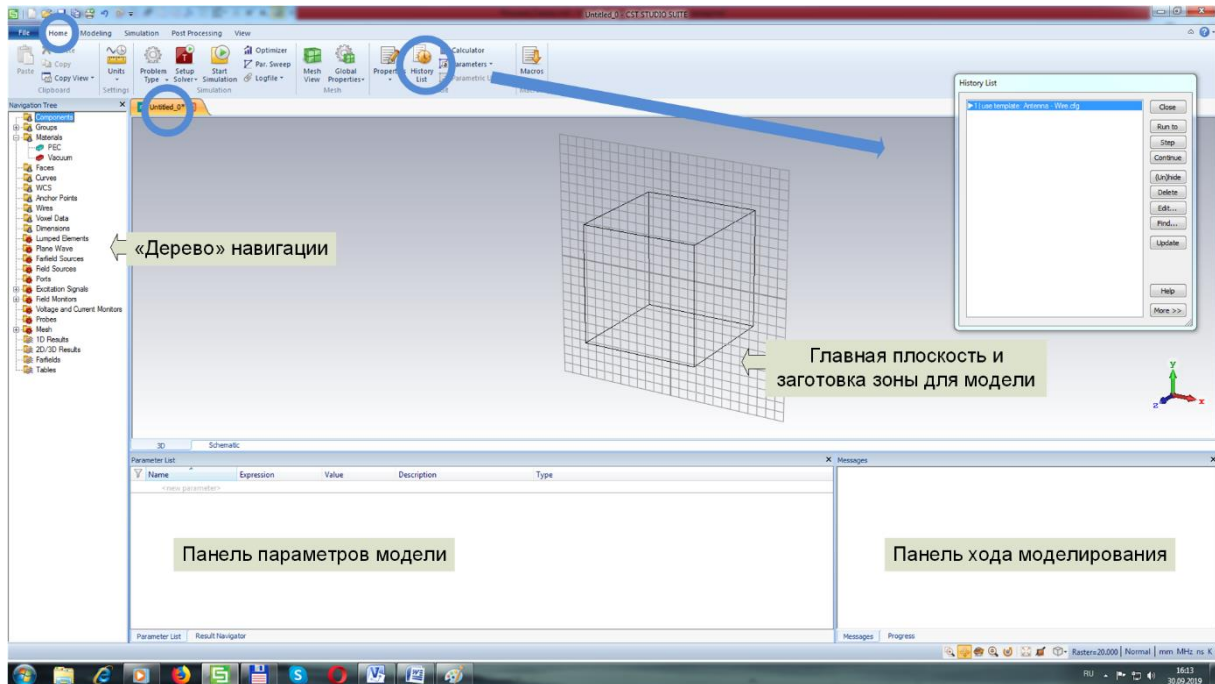


Рис. 2.10 — Вид основного окна после вызова *History List*

Перед моделированием необходимо сохранить проект в нужном каталоге под содержательным именем!

1.3.2. Задание начальных значений параметров

Средняя длина волны λ_0

$$\lambda_0 = \frac{300000}{600} = 500 \text{ мм.}$$

Четверть длины волны

$$q_{wl} = \lambda_0 / 4 = 500 / 4 = 125 \text{ мм.}$$

Эти величины при моделировании изменяться не будут.

Рекомендуется все параметры модели задавать как **переменные** или как **выражения**!

Параметры, которые будут варьироваться в значительных пределах (здесь, например, это длина первого отрезка фидера), удобно представлять выражениями, в которые введены коэффициенты модификации как **безразмерные** множители.

Если предполагаемый диапазон варьирования параметра относительно мал (например, диаметр провода второго отрезка фидера), то рекомендуется коэффициент модификации выражать в **процентах** (табл. 2.1).

Таблица 2.1 — Рекомендуемый вариант задания параметров модели

Обозначение	Начальное значение или выражение	Примечание
qwl	125	четверть длины волны, мм
$kml1$	4	коэффициент модификации длины первого отрезка фидера: число четвертей длины волны
$lf1$	$kml1 * qwl$	длина первого отрезка фидера
$lf2$	qwl	длина второго, четвертьволнового отрезка фидера
$df1$	1.8	диаметр провода первого отрезка
$sf1$	3.2	расстояние между центрами проводов первого отрезка — варьироваться не будет
$kmd2$	0	коэффициент модификации диаметра провода второго отрезка в процентах
$df2$	$(100 + kmd2) * df1 / 100$	диаметр провода второго отрезка
$kms2$	0	коэффициент модификации расстояния между проводами второго отрезка в процентах
$sf2$	$(100 + kms2) * sf1 / 100$	расстояние между центрами проводов второго отрезка
res	180	активное сопротивление нагрузки в омах
cap	$10 * 1e-12$	ёмкость нагрузки в фарадах
ind	$10 * 1e-9$	индуктивность нагрузки в генри

1.3.3. Разработка геометрии модели

Переходим к разделу *Modelling* и выбираем нужные графические примитивы (рис. 2.11).

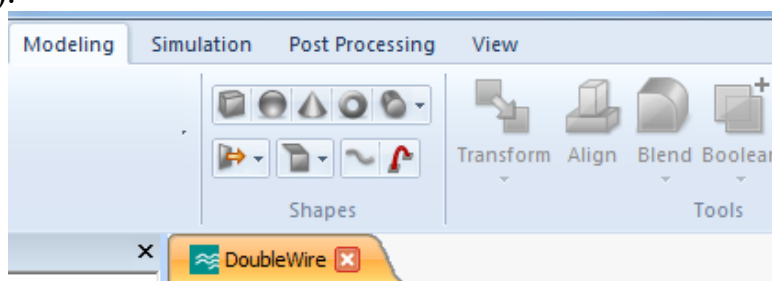


Рис. 2.11 — Вид панели графических 3D-примитивов

Провода обоих отрезков фидера имеют вид цилиндров, размещённых соосно и пристыкованных друг к другу торцами. Провода разместим в плоскости xOz вдоль оси z симметрично.

В силу симметрии достаточно построить **по одному** проводу каждого отрезка, затем для получения двухпроводного фидера воспользоваться инструментами трансформации (см. ниже).

Первый провод первого отрезка создаём следующими действиями:

- выбираем примитив «цилиндр» (*Cylinder*), нажимаем *Esc* для перехода к диалоговому окну, в котором устанавливаем ориентацию (*Orientation*) вдоль оси *z* и вводим внешний радиус (*Outer Radius*) $df1/2$, внутренний радиус (*Inner Radius*) оставляем равным нулю, центр по оси *x* (*Xcenter*) $sf1/2$, центр по оси *y* (*Ycenter*) 0, начало по оси *z* (*Zmin*) 0, конец по оси *z* (*Zmax*) $lf1$;
- нажимаем *Preview*, и если цилиндр получился правильно, то выбираем материал (*Material*) — идеальный проводник *PEC* и подтверждаем готовность, нажав *OK* (рис. 2.12).

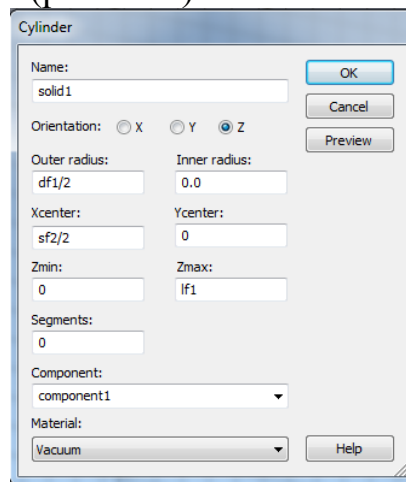


Рис. 2.12 — Вид окна создания цилиндра для первого провода

Первый провод второго отрезка выполняем аналогично, пристраивая его к концу первого. При этом параметры задаём следующим образом:

- *Outer Radius*: $df2/2$;
- *Inner Radius*: 0;
- *Xcenter*: $sf2/2$;
- *Ycenter*: 0;
- *Zmin*: $lf1$;
- *Zmax*: $lf1 + lf2$.

В дереве навигации (*Navigation Tree*) появится каталог *Component 1*. Открываем его: он состоит из двух частей типа *Solid* (рис. 2.13).

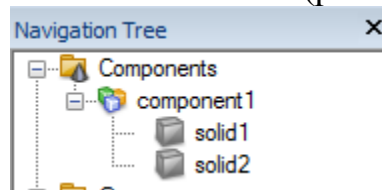


Рис. 2.13 — Состав компонента *Component 1*

Так как соединение проводов не будет разрываться, применим операцию логического объединения *Boolean Add*:

- выделяем два элемента *Solid 1* и *Solid 2* (эти можно сделать на изображении или в *Navigation Tree*);
- выбираем операцию *Boolean Add* на панели *Tools* (см. рис. 2.10).

В дереве *Navigation Tree* останется только один элемент *Solid 1*, но сохраняется возможность независимо изменять размеры каждого элемента.

Для получения двухпроводного фидера элемент *Solid 1* повторяем методом зеркальной трансформации:

- выделяем элемент *Solid 1*;
- на панели *Tools* выбираем операцию *Transform* (см. рис. 2.11) и выполняем настройку этой операции: вид *Mirror* с повторением (метка в поле *Copy*), количество повторений (*Repetition factor*) — одно, вектор нормали к плоскости отражения (*Mirror plane normal*) — в сторону отрицательных значений по оси *x*: $x = -1$, $y = 0$, $z = 0$; центр плоскости зеркального отражения (*Mirror plane origin*) — нулевые значения,
- проверяем правильность настроек, нажав *Preview*, и выполняем трансформацию, нажав *OK* (рис. 2.14).

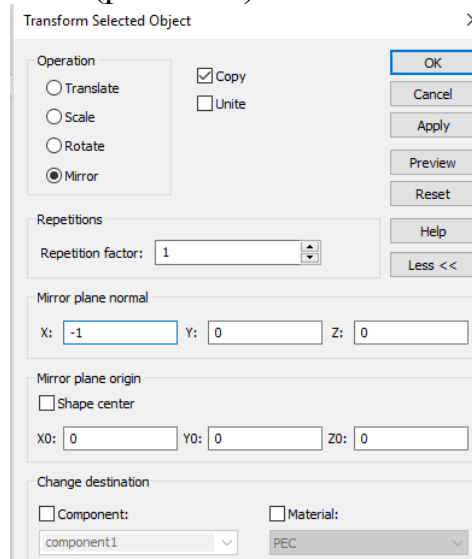


Рис. 2.14 — Настройка зеркального отображения половины модели

Так как новый элемент получен из первого, в дереве *Navigation Tree* появится элемент с именем *Solid 1_1*, содержащим номер исходного элемента.

Для подключения к фидеру нагрузки и порта переходим к разделу **Simulation**.

Последовательную сосредоточенную *RLC*-нагрузку включаем между торцами проводников второго, четвертьволнового отрезка фидера следующими действиями:

- вызываем окно настроек *Lumped Element*;
- выбираем тип нагрузки *RLC Series*, задаём номиналы элементов — они содержатся в наших переменных *res*, *cap*, *ind*;
- задаём координаты концов нагрузки: $x_1 = df/2 - sf/2$; $y_1 = 0$; $z_1 = lf_1 + lf_2$; $x_2 = -df/2 + sf/2$; $y_2 = 0$; $z_2 = lf_1 + lf_2$;

- проверяем положение нагрузки (*Preview*), и завершаем вставку *OK* (рис. 2.15).

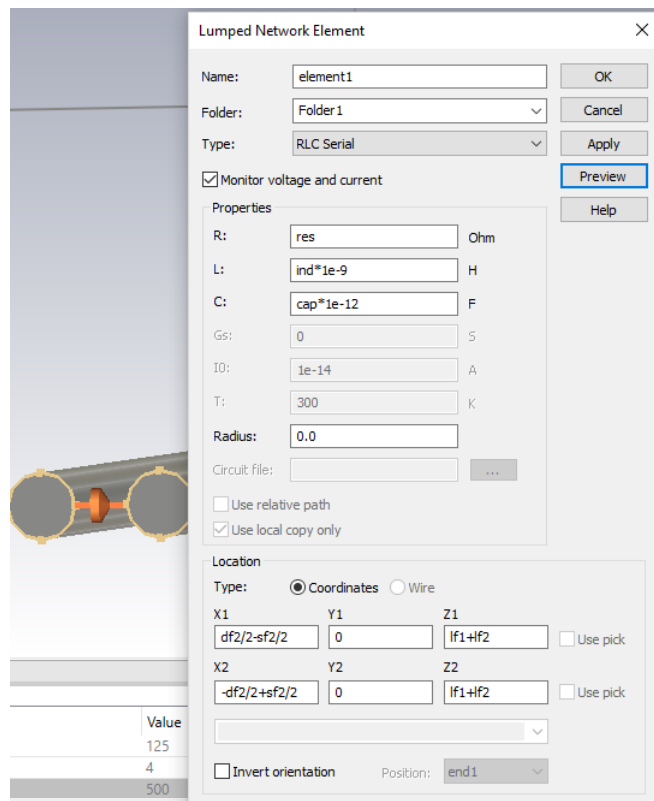


Рис. 2.15 — Вид окна настройки нагрузки и вид модели с нагрузкой

Перед заданием порта, для удобства просмотра, поворачиваем изображение и подбираем его размеры так, чтобы были хорошо видны торцы проводников на входе первого отрезка фидера (рис. 2.16).

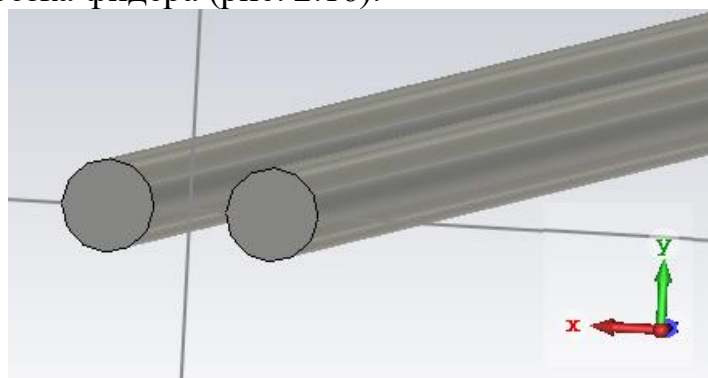


Рис. 2.16 — Вид входа фидера

В меню *Modelling* выбираем *Discrete Port* и в диалоговом окне (рис. 2.17) задаём его внутреннее сопротивление *Impedance* — *res* и координаты зажимов:

- $x1 = df1/2 - sf1/2$; $y1 = 0$; $z1 = 0$;
- $x2 = -df1/2 + sf1/2$; $y2 = 0$; $z2 = 0$.

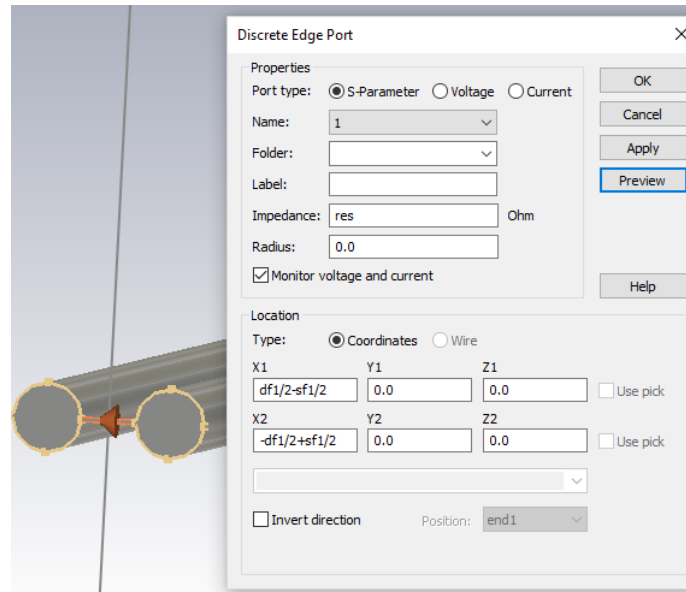


Рис. 2.17 — Вид окна настройки порта и вид модели с портом

1.3.4. Настройка параметров анализа и выполнение расчётов

В разделе **Simulation** выполняем следующие действия:

- в окне *Background* проверяем настройку «окружающей среды»: выбранную по умолчанию среду типа *Normal* изменять не следует;
- в окне границ зоны анализа *Boundaries* выбираем «открытые с дополнительным пространством» — *Open (add space)*.

В разделе **Post Processing** открываем окно *S-Parameter Calculations* и проверяем, стоят ли пометки в строках *Always Calculate Z and Y Matrices* и *Always Calculate VSWR*: при необходимости устанавливаем эти пометки (рис. 2.18).

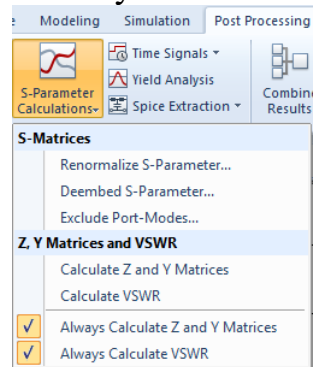


Рис. 2.18 — Требуемый вид окна настроек *S-Parameter Calculations* раздела *Post Processing*

Возвращаемся в раздел **Simulation**. Так как заранее неизвестно, сколько понадобится элементов разбиения для достижения требуемой точности, в окне *Setup Solver* выбираем **адаптивное уточнение сетки** (*Adaptive mesh refinement*).

Теперь можно давать команду на выполнение расчёта *Start Solver*.

Если адаптивный расчёт закончился при достижении заданной точности, то появится всплывающее окно, в котором программа предложит отказаться от адаптивного расчёта: следует дать согласие на переход к расчёту с фиксированной сеткой.

1.3.5. Просмотр результатов расчёта входных характеристик

В дереве проекта *Navigation Tree* выбираем раздел *1D Results*, затем — нужные характеристики: чаще всего это *S-parameters* → *S11* или *VSWR* → *VSWR1*. На графиках можно наблюдать результаты всех адаптивных «прогонов», что позволяет чисто визуально оценивать «сходимость» результатов.

Обращаемся к окну *Result Navigator*. После адаптивного расчёта в нём отображаются обозначения, присваиваемые результатам (*3D run ID*) и номера «прогонов» (*Mesh Pass*). Последнему «прогону» соответствует строка *Current Run* и если промежуточные результаты нас не интересуют, можно поставить в ней пометку в виде канцелярской кнопки: остальные графики отключатся.

Границы графиков устанавливаются автоматически, что может оказаться неудачным. Например, уровень *S11* ниже -30 дБ соответствует практически идеальному согласованию, а уровень КСВ выше 5 — слишком низкому КПД передачи энергии в нагрузку. Чтобы выбрать границы вручную, щёлкаем **правой** кнопкой мыши на поле графика, выбираем строку *Plot Properties*, убираем пометку *Auto range* для нужной оси (*X* или *Y*) и вводим нужные пределы (рис. 2.19).

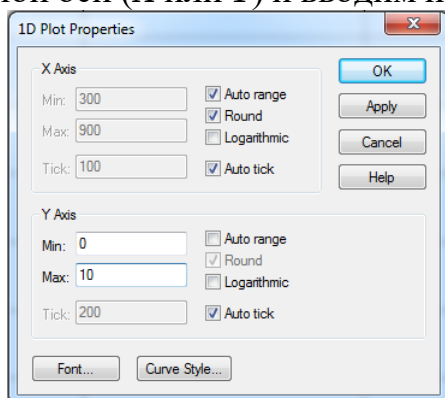


Рис. 2.19 — Возможный вид окна настроек графика частотной зависимости КСВ (VSWR)

Для удобства получения количественных данных в окне настроек графика можно задать опцию *Show Measure Lines* (рис. 2.20). Появятся две пары линий, положение каждой можно изменять, «захватив» линию левой кнопкой мыши. Для точной установки, например, граничного уровня КСВ, вместо «захвата» применяется двойной щелчок: во всплывшем окне можно набрать нужное значение.

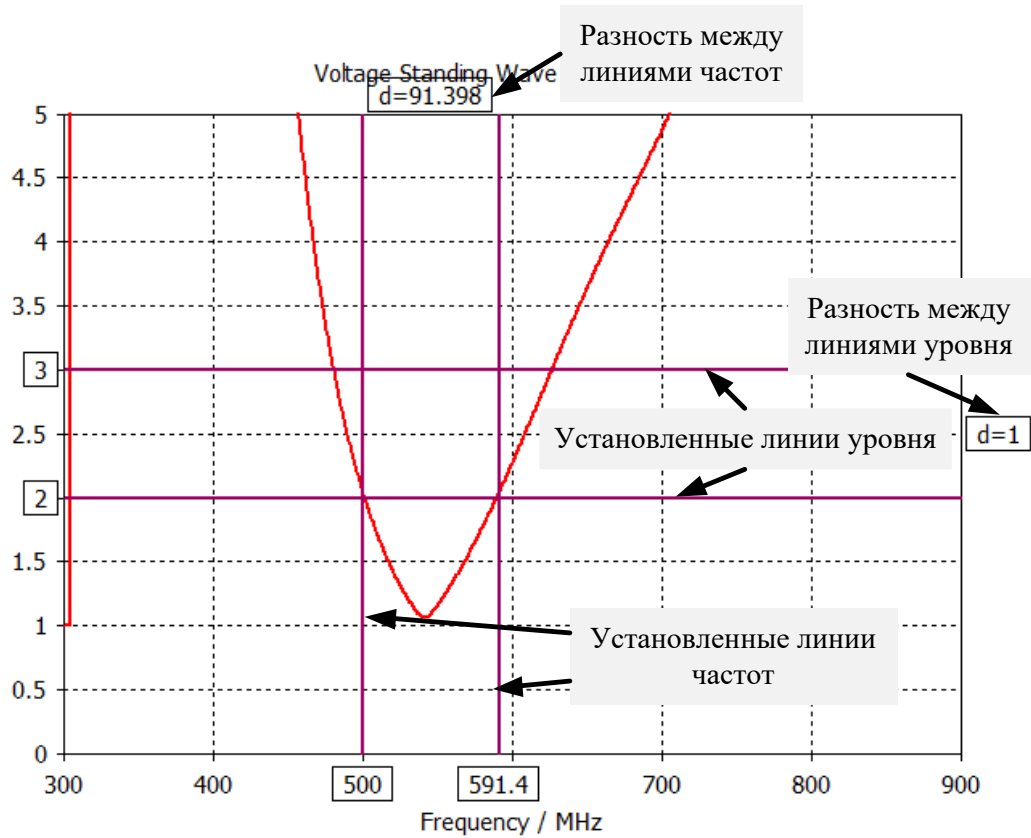


Рис. 2.20 — Пример графика частотной зависимости КСВ с измерительными линиями

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ ЗАДАНИЯ

Необходимо дать достаточно полные ответы на три вопроса, индивидуальный набор которых выбирается по номеру в списке группы (табл. 2.1).

Таблица 2.1 — Индивидуальные задания к теоретической части контрольной работы

Номер в списке группы	Вопросы
1.	1, 16, 22
2.	2, 17, 23
3.	3, 18, 24
4.	4, 19, 2
5.	5, 20, 26
6.	6, 21, 27
7.	2, 7, 22
8.	6, 8, 23
9.	9, 16, 24
10.	10, 17, 25
11.	11, 18, 26
12.	12, 19, 27
13.	13, 20, 28
14.	14, 21, 29
15.	3, 15, 30

1. Запишите выражения для падающих волн напряжения и тока в двухпроводном фидере с потерями и без потерь. Какие параметры фидера в них входят?
2. В чём состоит физический смысл понятия «волновое сопротивление фидера»?
3. Какие составляющие входят в параметр «постоянная распространения» при наличии потерь в фидере и при отсутствии потерь?
4. Как вводится коэффициент отражения по напряжению? Как он изменяется от сечения к сечению фидера? Чем отличается коэффициент отражения по току от коэффициента отражения по напряжению?
5. Какие математические обозначения и в каких случаях применяются для коэффициента отражения?
6. Запишите соотношение, связывающее коэффициент отражения и сопротивление нагрузки фидера в любом его сечении. При каких условиях модуль коэффициента отражения равняется нулю и какое это имеет практическое значение?

7. Какие режимы работы фидера называются «режим бегущих волн», «режим стоячих волн», «режим смешанных волн»?
8. Через какое расстояние повторяется картина распределения амплитуд смешанных или стоячих волн в фидере? Через какое расстояние эта картина изменяется на противоположную?
9. Какие условия на фазу коэффициента отражения выполняются в сечениях максимумов и в сечениях минимумов амплитуды напряжения? Где при этом расположены сечения максимумов и минимумов амплитуды тока?
10. Как вводятся коэффициент стоячей волны и коэффициент бегущей волны по напряжению? Какой из них удобнее для применения на практике? Почему вместо сокращения КСВН применяют КСВ?
11. Запишите два варианта выражения, связывающего коэффициент отражения и КПД передачи энергии из фидера в нагрузку: в размах и децибелах.
12. Запишите выражение, связывающее коэффициент отражения и КПД передачи энергии из фидера в нагрузку (в размах), и преобразуйте его в выражение, связывающее КПД и КСВ.
13. Из каких соображений устанавливают требования на допустимое рассогласование фидера со входом передающей антенны и со входом приёмной антенны?
14. Запишите выражения для входного сопротивления отрезка фидера произвольной длины: через коэффициент отражения и через сопротивление нагрузки.
15. Опишите свойства полуволнового отрезка фидера с волновым сопротивлением ρ_F . Как изменится входное сопротивление этого отрезка, если его волновое сопротивление увеличить в два раза?
16. Предположим, что между основным фидером с волновым сопротивлением ρ_F и его чисто активной нагрузкой r , подключён четвертьволновый отрезок фидера с волновым сопротивлением ρ_{FQ} . Выведите выражение для определения величины ρ_{FQ} , при которой нагрузка будет согласована с основным фидером.
17. Определите длины короткозамкнутого и разомкнутого отрезков фидера с волновым сопротивлением ρ_F , при которых они будут иметь одинаковую реактивность ёмкостного характера, по модулю равную волновому сопротивлению фидера.
18. Определите длины короткозамкнутого и разомкнутого отрезков фидера с волновым сопротивлением ρ_F , при которых они будут иметь одинаковую реактивность индуктивного характера, по модулю равную волновому сопротивлению фидера.
19. Как влияет на волновое сопротивление коаксиального фидера диэлектрическая проницаемость заполнения? Почему основные типы коаксиальных кабелей имеют волновые сопротивления 50 Ом и 75 Ом?

20. Сравните достоинства и недостатки коаксиальных кабелей с полиэтиленовой и фторопластовой изоляцией.
21. Перечислите области применения двухпроводных, коаксиальных и микрополосковых фидеров. Сопоставьте их достоинства и недостатки.
22. Почему создание нового проекта в CST MWS рекомендуется выполнять через шаблон (Template)?
23. По каким причинам параметры модели рекомендуется задавать либо как переменные, либо в виде расчётных формул?
24. Предположим, что при создании пространственного тела с помощью графического примитива один из параметров оказался не определённым заранее. Что произойдёт при выборе опции Preview или OK?
25. Какими действиями можно изменить геометрические параметры созданного ранее компонента модели?
26. Какие виды материалов можно задавать пространственным телам по умолчанию? Как расширить набор материалов и изменить материал готового компонента модели?
27. Два параллельных цилиндра можно создать на основе одного, используя инструменты Transform Mirror или Transform Rotate. В чём разница полученных результатов?
28. Для чего следует проверять перед расчётом настройки Background и Boundaries?
29. Какова оптимальная стратегия определения числа элементов разбиения пространства (Cells) при первом и последующих расчётах?
30. Какими действиями можно проверить и вручную подобрать число элементов разбиения пространства (Cells)?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Учебно-методическое пособие по оформлению текстовых работ преподавателей и обучающихся всех форм обучения по всем направлениям и специальностям кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» / СевГУ; сост. В. Г. Слёзкин. — Севастополь : Изд-во СевГУ, 2020. — 26 с.
2. Учебно-методическое пособие «Лабораторный практикум по дисциплине «Моделирование устройств сверхвысоких частот и антенн» для обучающихся очной и заочной форм обучения направлений 11.04.01 Радиотехника и 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи / СевГУ; сост. В. Г. Слёзкин. — Севастополь: Изд-во СевГУ, 2020. — 71 с.
3. МУ СВЧ и А_ Контрольная работа_Титульный лист.doc / URL: <https://cloud.mail.ru/public/z5cA/AxFTcfbQb>. — [Текст: электронный].
4. МУСВЧ и А_ Методические материалы ЗФО.rar / URL: <https://cloud.mail.ru/public/eoeV/2tsUEGs5M>. — [Текст: электронный].
5. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ / Д. М. Сазонов. — М.: Высш. шк., 1988. — 432 с.

Учебное издание

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
УСТРОЙСТВ СВЧ И АНТЕНН**

Учебно-методическое пособие

Составители: **Слёзкин** Виталий Геннадьевич,
Боков Геннадий Викторович

В авторской редакции

Изд. № 144/2022. Объем 2 п.л. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,96.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»