

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Высшая технологическая школа
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ»

ИНЖЕНЕРНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ

АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторного практикума
для студентов очной и заочной форм обучения по направлениям
11.03.01 – Радиотехника,
11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи
и очной формы обучения по специальности
11.05.01 – Радиоэлектронные системы и комплексы

В трех частях

Часть 1

Севастополь
СевГУ
2026

УДК 621.396.67(076.5)

ББК 32.845я73

A720

Р е ц е н з е н т:

И. Л. Афонин - д-р техн. наук, профессор

Ответственный за выпуск:

И. Л. Афонин - д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Составители: В. В. Головин, М. О. Ткаченко, А. С. Манько

A720 Антенные системы. Антенные системы радиоэлектронных комплексов : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума для студентов очной и заочной форм обучения по направлениям 11.03.01 – Радиотехника, 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи и очной формы обучения по специальности 11.05.01 – Радиоэлектронные системы и комплексы. – В 3-х частях. Ч. 1/ Севастопольский государственный университет, Высшая технологическая школа «Севастопольский приборостроительный институт», Инженерный факультет, кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации» ; сост.: В. В. Головин, М. О. Ткаченко, А. С. Манько. – Севастополь : СевГУ, 2026. – 71 с. – Текст : электронный.

Цель учебно-методического пособия – оказание помощи обучающимся очной и заочной форм обучения в подготовке и выполнении лабораторного практикума по дисциплине «Антенные системы» («Антенные системы радиоэлектронных комплексов»), а также в получении ими теоретических знаний и приобретении практических навыков исследования линий передачи СВЧ, устройств на их основе и антенных систем.

УДК 621.396.67(076.5)

ББК 32.845я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 15 от 01 июля 2025 г.

© Головин В. В., Ткаченко М. О.,
Манько А. С., сост., 2026

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. «Исследование частотных характеристик согласующих устройств на основе микрополосковых линий передачи в <i>AWR Microwave Office</i> ».....	6
1.1 Цель работы	6
1.2 Теоретические сведения	6
1.2.1 Линии передачи в СВЧ-диапазоне	6
1.2.2 Согласование в СВЧ-диапазоне.....	8
1.2.3 Принципы согласования устройств СВЧ и антенн.....	10
1.2.4 Микрополосковые линии передачи.....	14
1.2.5 Устройства для согласования активных сопротивлений	16
1.2.5.1 Четвертьволновый трансформатор	16
1.2.5.2 Многоступенчатый четвертьволновый трансформатор.....	21
1.2.5.3 Трансформатор на основе плавного перехода	23
1.2.6 Устройства для компенсации реактивных сопротивлений	24
1.2.7 Устройства для согласования комплексных сопротивлений	29
1.2.8 Особенности широкополосного согласования антенн.....	33
1.2.9 Общие сведения о САПР <i>AWR Microwave Office</i>	34
1.3 Постановка индивидуального задания.....	39
1.4 Выполнение лабораторной работы	41
1.4.1 Подготовка проекта в <i>AWR Microwave Office</i>	41
1.4.2 Расчёт и моделирование четвертьволнового трансформатора	44
1.4.3 Расчёт и моделирование двухступенчатого четвертьволнового трансформатора.....	55
1.4.4 Расчёт и моделирование трансформатора с плавным переходом...	57
1.4.5 Расчёт и моделирование согласующих параллельных шлейфов	61
1.4.6 Расчёт и моделирование четвертьволновых трансформаторов с согласующим параллельным шлейфом	64
1.5 Содержание отчёта.....	67
1.6 Контрольные вопросы	68
Библиографический список.....	70
Приложение А. Образец оформления титульного листа отчёта по лабораторной работе	71

Введение

Дисциплина «Антенные системы» изучается студентами очной и заочной форм обучения по направлениям 11.03.01 Радиотехника, 11.03.02 Информационные технологии и системы связи и очной формы обучения по специальности 11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы.

Настоящие методические указания посвящены лабораторной работе, в ходе выполнения и защиты которой студенты получают практические навыки моделирования и исследования характеристик согласующих устройств сверхвысоких частот, к которым относятся четвертьволновые трансформаторы, многоступенчатые трансформаторы, согласующие шлейфы и устройства на основе плавных переходов.

После выполнения первой лабораторной работы студент должен знать:

- основные понятия микрополосковых линий передачи СВЧ;
- принципы действия и методы расчёта различных типов согласующих устройств;
- методы анализа и измерения характеристик согласования антенных систем;
- порядок работы в одной из систем автоматического проектирования (САПР), используемой в профессиональной деятельности;
- методики оптимизации заданных характеристик согласующих устройств для антенных систем.

В результате выполнения данной лабораторной работы студент должен уметь:

- рассчитать параметры согласующих устройств на основе микрополосковых линий передачи;
- составить принципиальную схему и топологию согласующего устройства в пакете САПР;
- выполнить моделирование разработанных устройств и определить их характеристики с помощью пакета САПР;
- выполнить исследование характеристик разработанных устройств и оптимизацию их параметров;
- оформить техническую документацию на устройства в соответствии с действующими стандартами.

Лабораторные работы выполняются фронтальным методом индивидуально каждым студентом. Все задания выполняются с использованием пакета программ *AWR Microwave Office*.

Лабораторная работа выполняется в два этапа. На первом этапе студенты самостоятельно должны изучить по настоящим методическим указаниям, конспекту лекций и рекомендованной литературе, приведенной в библиографическом списке, основные теоретические положения лабораторной работы.

На втором этапе, выполняемом в лаборатории университета, студенты должны:

- выполнить программу лабораторной работы, демонстрируя преподавателю промежуточные результаты выполнения и сохраняя полученные результаты в виде числовых данных и графиков в черновую версию отчёта;
- оформить отчёт по лабораторной работе в соответствии с указаниями, которые приводятся в конце описания лабораторной работы;
- защитить отчёт по лабораторной работе.

Образец титульного листа отчёта по лабораторной работе представлен в приложении А.

Отчёт по лабораторной работе оформляется в соответствии с методическими указаниями по оформлению текстовых работ [1] независимо каждым студентом с использованием ПК и печатается с помощью принтера. По усмотрению преподавателя допускается представление оформленного отчёта в электронном виде на ПК.

По краям листа должны быть оставлены поля: левое — 25 мм; верхнее и нижнее — 20 мм; правое — 15 мм. Рисунки и таблицы должны быть пронумерованы и сопровождаться подписями и пояснениями.

При выполнении лабораторной работы и подготовке к защите рекомендуется использовать учебную и справочную литературу [2—6].

Лабораторная работа № 1

«Исследование частотных характеристик согласующих устройств на основе микрополосковых линий передачи в *AWR Microwave Office*»

1.1 Цель работы

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо изучить основные виды планарных согласующих устройств на основе микрополосковых линий передачи (МЛП), применяемых в СВЧ-технике для согласования импедансов СВЧ-многополюсников и антенн, а также изучить методы, применяемые в САПР *AWR Microwave Office*, для моделирования частотных характеристик СВЧ-цепей.

Для каждого заданного согласующего устройства (СУ) необходимо:

- рассчитать параметры СУ, исходя из заданных параметров подложки МЛП, импеданса нагрузки, центральной частоты диапазона и допустимого значения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН);
- построить модель рассчитанного СУ в *AWR Microwave Office*;
- исследовать частотные характеристики, полученные в результате моделирования.

1.2 Теоретические сведения

1.2.1 Линии передачи в СВЧ-диапазоне

Как известно, в устройствах диапазона **сверхвысоких частот (СВЧ)** сигналы передаются посредством различных **направляющих структур**, в качестве которых могут выступать **волноводы, микрополосковые линии передачи, копланарные линии передачи** и др. Они предназначены для ограничения пространства, в пределах которого распространяются электромагнитные волны (**ЭМВ**), и придания им за счёт этого заданного направления распространения.

В соответствии с большинством общепринятых классификаций, диапазоном СВЧ принято считать излучение ЭМВ с частотой **от 300 МГц и выше** (как правило, до 300 ГГц). Длина ЭМВ λ , распространяющейся в пространстве со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, на частоте 300 МГц может быть определена как

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{300 \cdot 10^6} = 1 \text{ м.}$$

Исходя из этого, длины волн в СВЧ-диапазоне соответствуют значениям **от 1 м и ниже**, что становится сопоставимым с размерами направляющих структур и электронных компонентов. Вследствие этого при анализе

режимов их работы необходимо учитывать **волновой характер колебаний вдоль структуры**, что порождает неравномерное распределение токов, напряжений и комплексного сопротивления вдоль линии передачи (ЛП), как показано на рисунке 1.1.

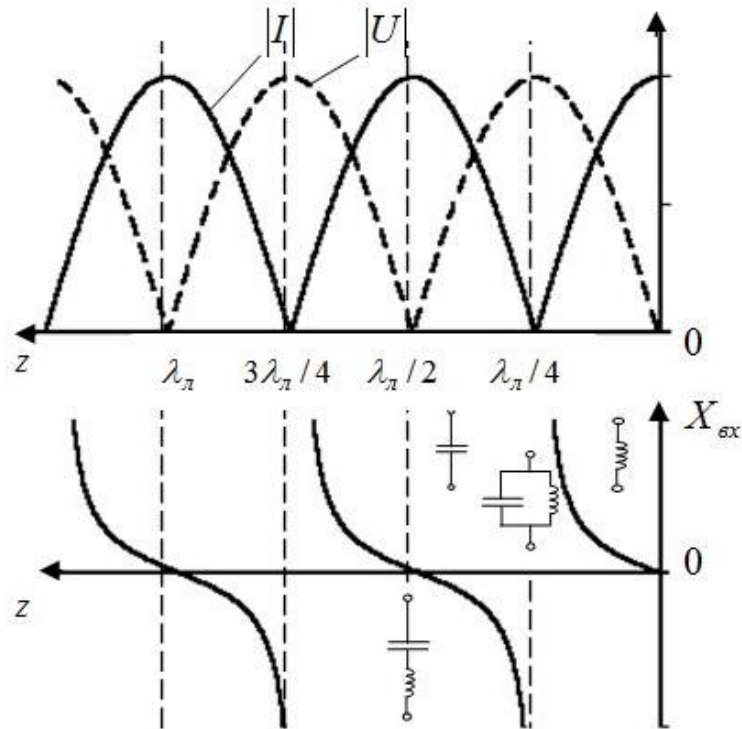


Рисунок 1.1 — Пример распределения амплитуд тока и напряжения, а также реактивного сопротивления вдоль ЛП при нагрузке $Z_H = 0$

Распределение комплексного сопротивления вдоль линии передачи можно рассчитать по формуле

$$Z_{\text{ЛП}}(x) = \rho \frac{Z_H + j\rho \operatorname{tg} kx}{\rho + jZ_H \operatorname{tg} kx}, \quad (1.1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Анализ выражения (1.1) показывает:

— распределение комплексного сопротивления вдоль ЛП носит периодический характер с **периодом повторения $\lambda/2$** с отступом $\lambda/4$ от начала отсчёта, т.е. подключение полуволнового отрезка ЛП не изменяет электрических свойств схемы;

— характер реактивного сопротивления изменяется в пределах периода от минус бесконечности при $z = 0$ до плюс бесконечности при $z = \lambda/2$, переходя через точку $X_{\text{вх}} = 0$ при $z = \lambda/4$;

— сопротивление ЛП трансформируется от холостого хода (ХХ) $z = \pm\infty$ до короткого замыкания (КЗ) $z = 0$ и наоборот через каждый четвертьволновый отрезок ЛП $\lambda/4$.

1.2.2 Согласование в СВЧ-диапазоне

Как было упомянуто ранее, роль ЛП в СВЧ-диапазоне заключается в передаче энергии (мощности) между различными устройствами, к которым относятся также и антенны.

В теории электрических многополюсников доказано, что при подключении двух многополюсников с выходным сопротивлением первого $Z_{\text{вых } 1} = R_{\text{вых } 1} + jX_{\text{вых } 1}$ и входным сопротивлением второго $Z_{\text{вх } 2} = R_{\text{вх } 2} + jX_{\text{вх } 2}$ **максимальный коэффициент передачи по мощности K_p** достигается при условии, если эти сопротивления являются **комплексно-сопряжёнными** по отношению друг к другу

$$Z_{\text{вых } 1} = Z_{\text{вх } 2}^*, \text{ или } \begin{cases} R_{\text{вых } 1} = R_{\text{вх } 2}; \\ X_{\text{вых } 1} = -X_{\text{вх } 2}. \end{cases} \quad (1.2)$$

Рассмотрим подключение ЛП, которая будет выполнять роль питающей линии антенны — **фидера** — с волновым сопротивлением $Z_{\text{вых ЛП}} = \rho$ к антенне (нагрузке фидера) со входным сопротивлением $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$. Как правило, при проектировании фидера волновое сопротивление ЛП выбирается равным **50 Ом**, что является международным стандартизированным значением.

Примечание. До недавнего времени были распространены также ЛП с волновым сопротивлением 75 Ом, которое подбиралось исходя из широкого применения телевизионных дипольных антенн со входным сопротивлением порядка $(73+j0)$ Ом на резонансной частоте.

Из-за разницы между выходным сопротивлением фидера, которое равняется его волновому сопротивлению $Z_{\text{вых ф}} = \rho$, и входным сопротивлением антенны $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}}$ в фидере возникает волна, которая распространяется в обратном направлении.

Волна, которая распространяется от генератора к нагрузке (в сторону антенны), называется **падающей волной a** . Волна, которая распространяется в обратном направлении от нагрузки (от антенны) в результате отражения от границы раздела двух сред с разными сопротивлениями, называется **отражённой волной b** .

В результате в фидере устанавливается режим, который может быть описан системой телеграфных уравнений

$$\begin{cases} u(x) = U_{\text{пад}}(x) + U_{\text{отр}}(x); \\ i(x) = I_{\text{пад}}(x) + I_{\text{отр}}(x). \end{cases} \quad (1.3)$$

Для описания степени отражения волны от нагрузки вводится понятие **комплексного коэффициента отражения (ККО)**, который обозначается заглавной греческой буквой «гамма» и обозначается как

$$\dot{\Gamma} = \frac{U_{\text{отр}}(0)}{U_{\text{пад}}(0)}. \quad (1.4)$$

Чем ближе модуль ККО к нулю, тем большая часть мощности передаётся в нагрузку (антенну). Идеальным случаем считается достижения равенства $\Gamma = 0$, что соответствует полной передаче всей мощности в нагрузку при условии комплексно-сопряжённого согласования фидера и антенны (режим бегущей волны).

ККО может быть выражен через сопротивления фидера и антенны как

$$\dot{\Gamma} = \frac{Z_{\text{н}} - \rho}{Z_{\text{н}} + \rho}. \quad (1.5)$$

Для описания степени согласования фидера и антенны (а также любых СВЧ-многополюсников) вводится понятие **коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН)**, который определяется через модуль ККО Γ как

$$K_{\text{СТУ}} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}. \quad (1.6)$$

Иногда в понятии коэффициента стоячей волны по напряжению КСВН словосочетание «по напряжению» опускают и подразумевают это по умолчанию, так что часто в литературе встречается более короткое равнозначное название — коэффициент стоячей волны (КСВ).

При необходимости КСВ может быть рассчитан через сопротивления фидера и антенны как

$$K_{\text{СТУ}} = \frac{1 + k}{1 - k}, \text{ где } k = \sqrt{\frac{(R_{\text{вх}} - \rho)^2 + X_{\text{вх}}^2}{(R_{\text{вх}} + \rho)^2 + X_{\text{вх}}^2}}. \quad (1.7)$$

Теоретически наилучшим значением КСВ является случай $K_{\text{СТУ}} = 1$. Из-за принципиальной невозможности идеального согласования в качестве критерия согласования рассматривают выполнение условия, **при котором КСВ во всём заданном диапазоне частот не превышает некоторого допустимого значения $K_{\text{СТУ доп}}$** , т.е.

$$K_{\text{СТУ}} \leq K_{\text{СТУ доп}}. \quad (1.8)$$

На практике чаще всего используются следующие критерии согласования антенн и устройств СВЧ:

— $K_{\text{СТУ}} \leq 1,5$ — **очень качественное согласование**, которое соответствует передаче ~96 % мощности в нагрузку и может считаться отличным для большинства антенн;

— $K_{\text{СТУ}} \leq 2,0$ — **качественное согласование**, которое соответствует передаче ~90 % мощности в нагрузку и может считаться достаточным для большинства антенн;

— $K_{\text{СТУ}} \leq 3,0$ — **удовлетворительное согласование**, которое соответствует передаче 75 % мощности в нагрузку и может считаться достаточным для антенн, работающих исключительно в режиме приёма и/или излучения небольших мощностей.

1.2.3 Принципы согласования устройств СВЧ и антенн

Как правило, входное сопротивление антенн изменяется в широком диапазоне значений в зависимости от частоты и значительно отличается от стандартного волнового сопротивления фидера $\rho = 50 \text{ Ом}$.

Пример частотной зависимости входного сопротивления одной из простейших антенн — полуволнового симметричного вибратора с резонансной частотой 600 МГц — показан на рисунке 1.2.

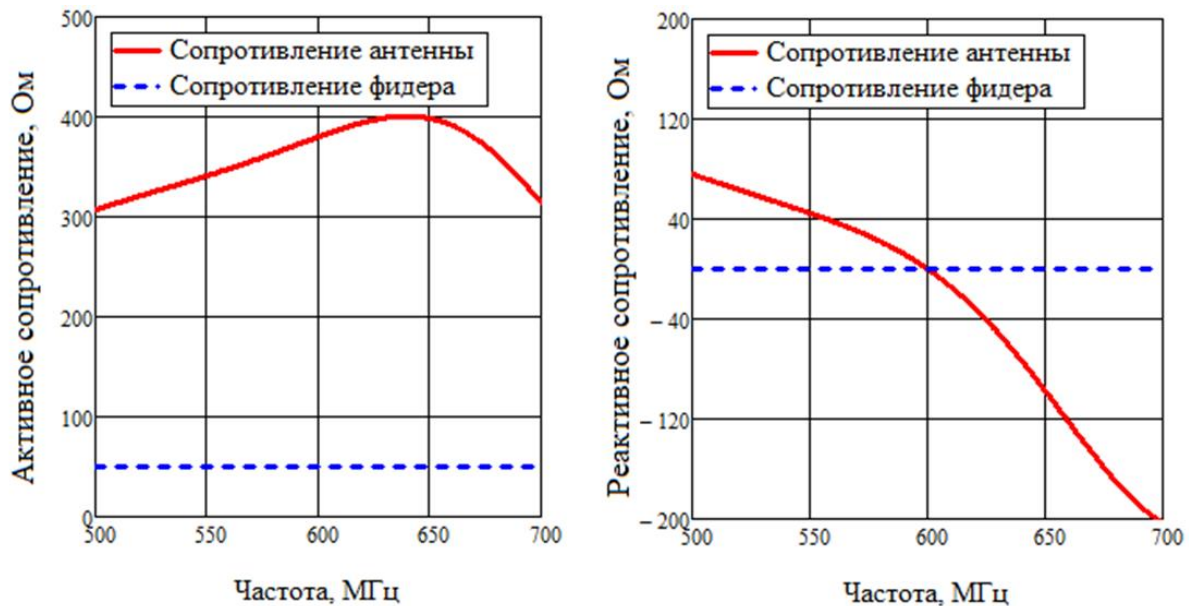


Рисунок 1.2 — Изменение входного сопротивления полуволнового симметричного вибратора с резонансной частотой 600 МГц

Можно показать, что при подключении такой антенны к 50-омному фидеру КСВ на частоте $f = 550 \text{ МГц}$ составляет 7,0, что соответствует передаче всего 44 % мощности в антенну (рисунок 1.3).

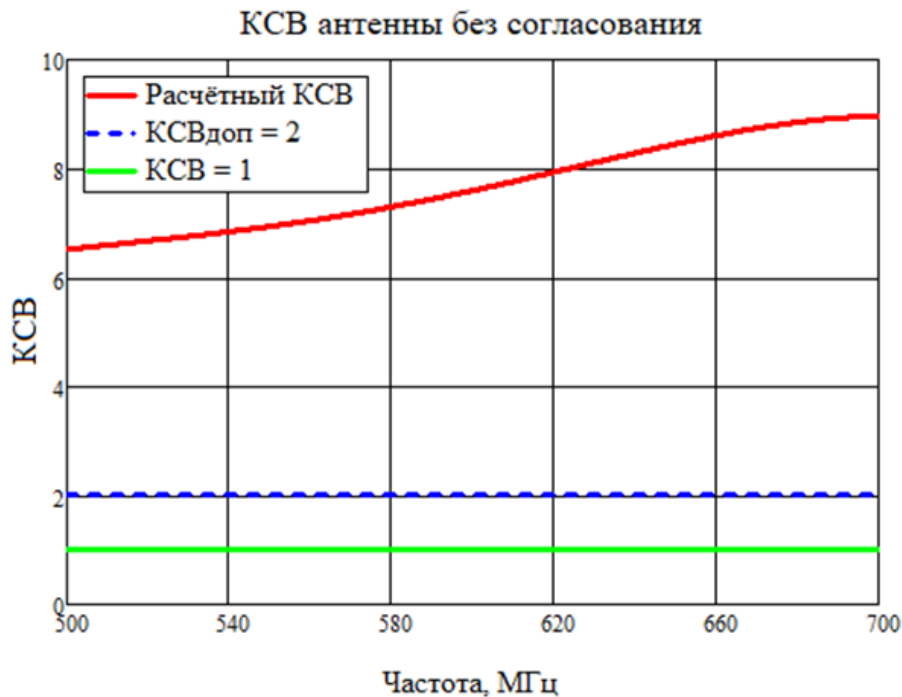


Рисунок 1.3 — Расчётные значения КСВ антенны без согласования

Для того, чтобы обеспечить качественные характеристики излучения антенны, необходимо прежде всего добиться удовлетворительных условий передачи мощности из фидера в антенну — т.е. **согласовать антенну с фидером в пределах заданного диапазона частот**. Это значит, что выходное сопротивление фидера в пределах заданного диапазона частот должно быть как можно ближе к комплексно-сопряжённому входному сопротивлению антенны, чтобы обеспечить как можно меньший КСВ.

Для того, чтобы обеспечить такое согласование и приблизить режим работы фидера к режиму бегущей волны, между фидером и антенной подключается **согласующее устройство (СУ)**, как показано на рисунке 1.4.

Роль согласующего устройства состоит в **трансформации сопротивлений** следующим образом:

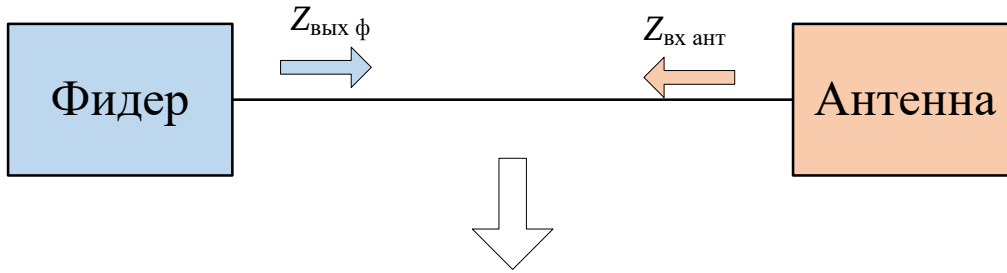
— входное сопротивление СУ в пределах рабочего диапазона частот согласовано с фидером, т.е.

$$Z_{\text{вх СУ}} \approx Z_{\text{вых ф}} = \rho; \quad (1.9)$$

— выходное сопротивление СУ в пределах рабочего диапазона частот согласовано с антенной, т.е.

$$Z_{\text{вых СУ}} \approx Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}. \quad (1.10)$$

а) Без согласования



б) С согласованием

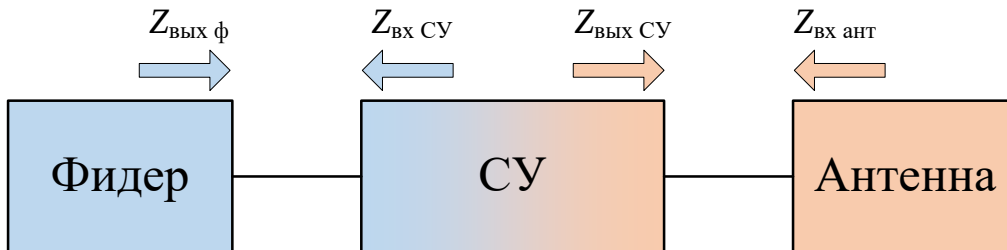


Рисунок 1.4 — Пояснение к принципу работы СУ

СУ любого из видов тем или иным образом решает следующие задачи:

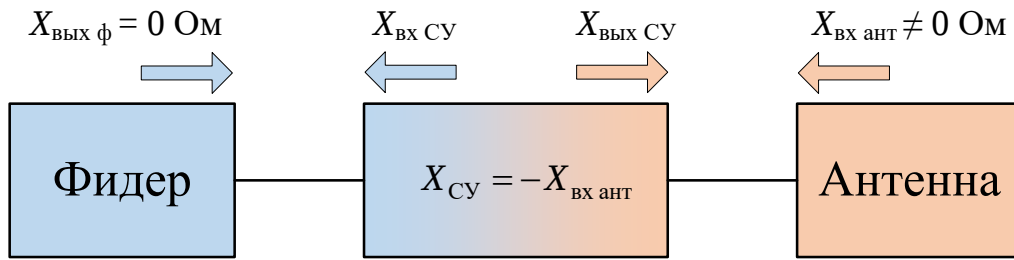
— **реактивная составляющая сопротивления антенны $X_{вх ант}$ компенсируется** путём использования в самом СУ реактивного элемента с противоположным сопротивлением $X_{СУ} = -X_{вх}$, в результате чего остаётся чисто активная часть сопротивления (рисунок 1.5, а)

$$X_{вых СУ} = X_{вх ант} \neq 0 \text{ Ом} \xrightarrow{СУ} X_{вх СУ} = X_{вых ф} = 0 \text{ Ом}; \quad (1.11)$$

— **оставшаяся активная составляющая сопротивления антенны $R_{вх ант}$ трансформируется** в значение, согласованное с фидером (рисунок 1.5, б)

$$R_{вых СУ} = R_{вх ант} \neq 50 \text{ Ом} \xrightarrow{СУ} R_{вх СУ} = R_{вых ф} = 50 \text{ Ом}. \quad (1.12)$$

а) Компенсация реактивного сопротивления



б) Трансформация активного сопротивления

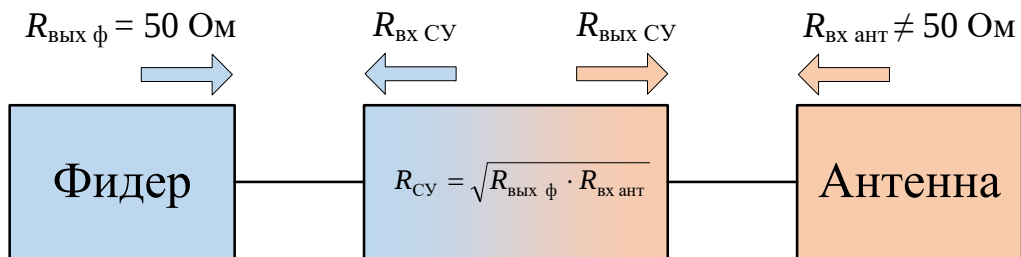


Рисунок 1.5 — Пояснение к принципу компенсации реактивного (а) и трансформации активного сопротивления (б)

Пример реализации согласования для исследуемой антенны может быть продемонстрирован зависимостями, показанными на рисунке 1.6.

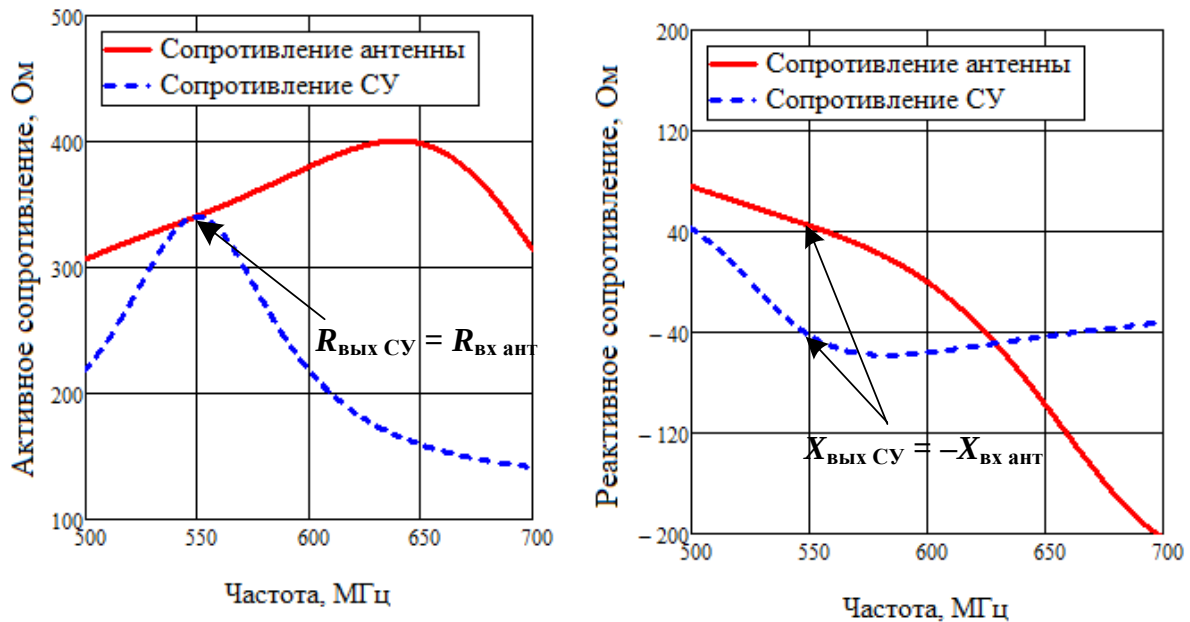


Рисунок 1.6 — Сравнение входного сопротивления исследуемой антенны и выходного сопротивления согласующего устройства

В результате согласования КСВ не превышает значения 2 в диапазоне частот 480—596 МГц (рисунок 1.7), что может считаться качественным согласованием и обеспечивает достаточную передачи мощности для возможности практического применения исследуемой антенны в данном диапазоне.

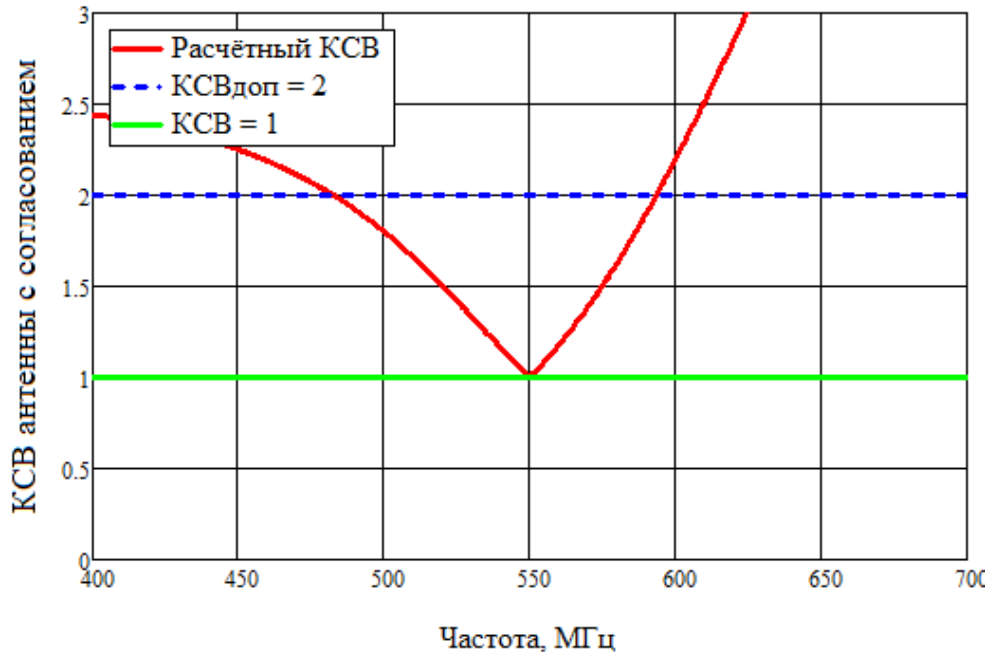


Рисунок 1.7 — Расчётные значения КСВ антенны с согласованием

В зависимости от сферы применения и технических характеристик, к антеннам и устройствам СВЧ могут предъявляться требования к возможности работы как в пределах сравнительно узкой, так и в пределах сравнительно широкой полосы частот $\Delta F = f_2 - f_1$. Это означает, что удовлетворительное согласование должно быть обеспечено, как минимум, в пределах всего заданного диапазона частот.

Для полосы частот с согласованием ΔF с центральной частотой диапазона f_0 вводится понятие **относительной полосы согласования** ξ :

$$\xi = \frac{\Delta F}{f_0}. \quad (1.13)$$

В дальнейшем будем считать, что:

- СУ является **узкополосным**, если $\xi \leq 15 \%$;
- СУ является **широкополосным**, если $15 \% \leq \xi \leq 50 \%$;
- СУ является **сверхширокополосным**, если $\xi > 50 \%$.

1.2.4 Микрополосковые линии передачи

Микрополосковая линия передачи (МЛП) — *microstrip transmission line* — представляет собой малогабаритную направляющую структуру, которая формируется на основе диэлектрической среды, ограниченной двумя или несколькими проводниками.

Наибольшее распространение получили МЛП, которые реализуются на основе диэлектрических подложек. Нижняя часть подложки покрывается металлизацией и формирует нижнюю обкладку МЛП, а на верхней части подложки наносятся полосковые проводники (рисунок 1.8).

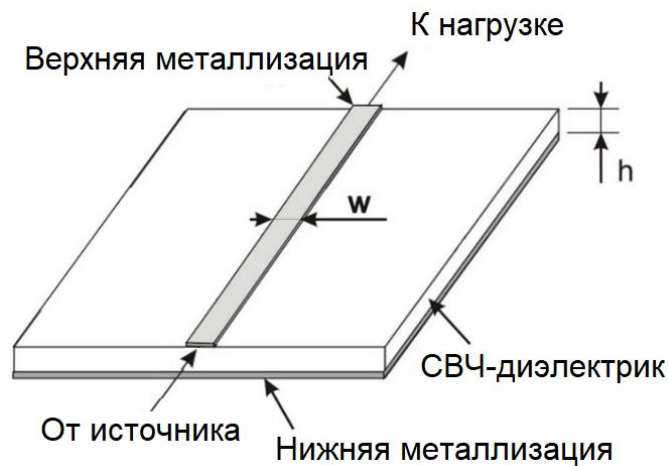


Рисунок 1.8 — Упрощённый вид МЛП

В такой структуре волны распространяются в полуоткрытой направляющей системе — объёме между нижней и верхней обкладками без боковых «стенок», образуя основную моду волны **квази-ТЕМ** (рисунок 1.9).

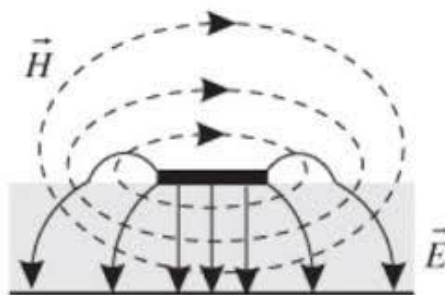


Рисунок 1.9 — Вид основной моды квази-ТЕМ

Выделяют следующие основные параметры МЛП:

— **относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки ϵ** , которая определяет длину волны в МЛП λ следующим образом:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (1.14)$$

где λ_0 — длина волны в свободном пространстве;

— **тангенс угла диэлектрических потерь $tg(\sigma)$** материала подложки, который влияет на величину омических потерь при распространении волны в МЛП;

— **толщина подложки H** , которая выбирается исходя из существующего ряда серийно производимых значений;

— **толщина фольгированного проводника T** , которая соответствует толщине верхнего проводника и, как правило, составляет 25—100 мкм;

— **ширина полоска W** , которая подбирается исходя из требуемого волнового сопротивления МЛП;

— **длина полоска L** , которая подбирается исходя из требуемых электрических свойств отрезка МЛП;

— **эффективная относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки $\epsilon_{эфф}$** , которую в общем случае для приближённых расчётов МЛП можно считать равной $\epsilon \approx \epsilon_{эфф}$;

— **волновое сопротивление ρ** , которое в общем случае приближённо может быть рассчитано как

$$\rho \approx \frac{87}{\sqrt{\epsilon_{эфф} + 1,41}} \cdot \ln \left(\frac{8 \cdot H}{W} + \frac{W}{4 \cdot H} \right). \quad (1.15)$$

В этой лабораторной работе будут рассмотрены практические реализации различных методов согласования, которые реализуются на основе отрезков **микрополосковых линий передачи (МЛП)**. Представленные далее принципы согласования справедливы для любых других видов направляющих структур с учётом необходимости пересчёта лишь самих примеров реализаций.

1.2.5 Устройства для согласования активных сопротивлений

Рассмотрим подключение фидера с выходным сопротивлением ρ к антенне, входное сопротивление которой имеет чисто резистивный характер (содержит нулевую реактивную составляющую) $Z_{вх ант} = R_{вх}$ — случай **чисто активной нагрузки**.

1.2.5.1 Четвертьволновый трансформатор

Четвертьволновый трансформатор (ЧВТ) представляет собой один из основных методов узкополосного согласования, который предназначен для согласования **активных сопротивлений** антенны и фидера.

В качестве простейшего СУ можно использовать ЧВТ (рисунок 1.10), который представляет собой **четвертьволновый отрезок МЛП** с волновым сопротивлением, которое подбирается как **среднее геометрическое согласуемых волновых сопротивлений**, т.е.

$$\begin{cases} l_{\text{ЧВТ}} = \lambda / 4; \\ \rho_{\text{ЧВТ}} = \sqrt{\rho \cdot Z_{\text{ВХ ант}}}. \end{cases} \quad (1.16)$$

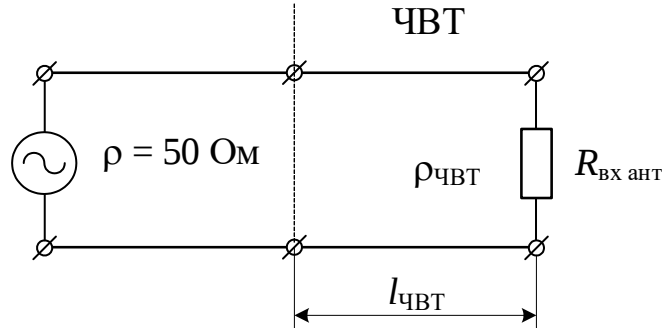


Рисунок 1.10 — Эквивалентная электрическая схема ЧВТ

В основе работы ЧВТ лежат электрические свойства отрезка ЛП с длиной $\lambda/4$, выходное сопротивление которого зависит от входного (трансформируется) в соответствии со следующим выражением:

$$Z_{\text{ВЫХ ЧВТ}} = \frac{\rho_{\text{ЧВТ}}^2}{Z_{\text{ВХ ЧВТ}}}. \quad (1.17)$$

Тогда, если подобрать входное сопротивление ЧВТ согласованным с фидером, т.е. $Z_{\text{ВХ ЧВТ}} = Z_{\text{ВЫХ ЛП}} = \rho$, а волновое сопротивление ЧВТ — в соответствии с (1.15), то выходное сопротивление ЧВТ окажется равным входному сопротивлению антенны

$$Z_{\text{ВЫХ ЧВТ}} = \frac{(\sqrt{\rho \cdot Z_{\text{ВХ ант}}})^2}{\rho} = Z_{\text{ВХ ант}}, \quad (1.18)$$

т.е. ЧВТ в качестве СУ является одновременно:

- **согласованным по входу с фидером**, поскольку $Z_{\text{ВХ ЧВТ}} = \rho$;
- **согласованным по выходу с антенной**, поскольку $Z_{\text{ВЫХ ЧВТ}} = Z_{\text{ВХ ант}}$.

Теоретически с помощью ЧВТ на частоте f_0 , соответствующей длине волны λ

$$f_0 = \frac{c}{\lambda \sqrt{\epsilon}}, \quad (1.19)$$

под которую подбирается четвертьволновая длина отрезка, возможно обеспечить идеальное согласование и достижение значения $K_{\text{СТУ}} = 1$.

Коэффициентом трансформации ЧВТ называется отношение согласуемых сопротивлений нагрузки (антенны) и источника (фидера)

$$N_{\text{ЧВТ}} = \frac{R_{\text{вых ЧВТ}}}{R_{\text{вх ЧВТ}}} = \frac{R_{\text{вх ант}}}{\rho}. \quad (1.20)$$

В зависимости от соотношения согласуемых сопротивлений, ЧВТ бывают двух видов:

— **понижающие ЧВТ**, если коэффициент трансформации $N_{\text{ЧВТ}} < 1$, пример вида топологии которых показан на рисунке 1.11, а;

— **повышающие ЧВТ**, если коэффициент трансформации $N_{\text{ЧВТ}} > 1$, пример вида топологии которых показан на рисунке 1.11, б.

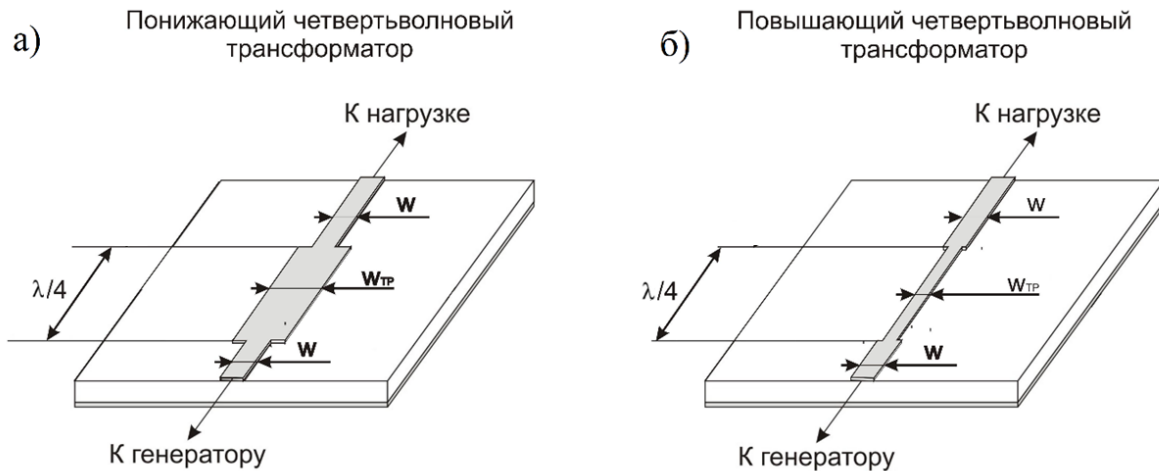


Рисунок 1.11 — Вид топологии понижающих (а) и повышающих (б) ЧВТ

Главным недостатком ЧВТ является его узкополосность, которая обусловлена самим резонансным характером СУ. Выражения (1.16)—(1.18) и соответствующие им электрические свойства справедливы лишь непосредственно на самой частоте f_0 . Любые отклонения от этой частоты вследствие конечной ширины спектра сигналов Δf приводят к нарушениям свойств ЧВТ, и, следовательно, неточному выполнению согласования.

Рассмотрим причины узкополосности СУ на основе трансформаторов импеданса.

Пусть входное сопротивление составляет антенны составляет $R_{\text{вх ант}} = 100 \text{ Ом}$. На границе, разделяющей среды фидера и антенны, без согласования имеет место значительный **перепад импеданса** $\Delta Z = 50 \text{ Ом}$ (рисунок 1.12), который порождает отражённую волну.

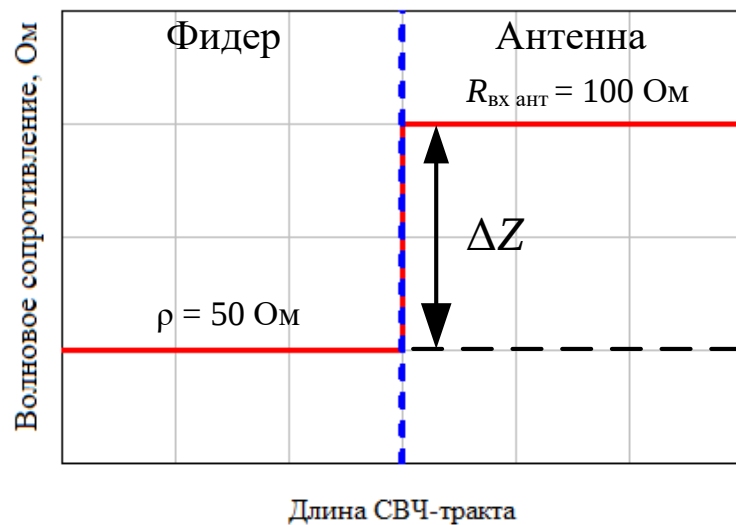


Рисунок 1.12 — Пояснение к возникновению перепада импедансов

Перепад импеданса ΔZ играет значимую роль в определении степени рассогласования при отклонениях частоты. Чем больше значение перепада импеданса ΔZ , тем больше числитель в (1.5) и тем в больших пределах изменяется модуль ККО в диапазоне частот. Следовательно, **чтобы уменьшить степень рассогласования между фидером (ЛП) и антенной (нагрузкой) в диапазоне частот, необходимо уменьшать перепад волновых сопротивлений между ними.**

В результате использования ЧВТ, рассчитанного на центральную частоту f_0 , между фидером, СУ и антенной возникают два перепада импеданса ΔZ_1 и ΔZ_2 , как иллюстрируется рисунком 1.13.

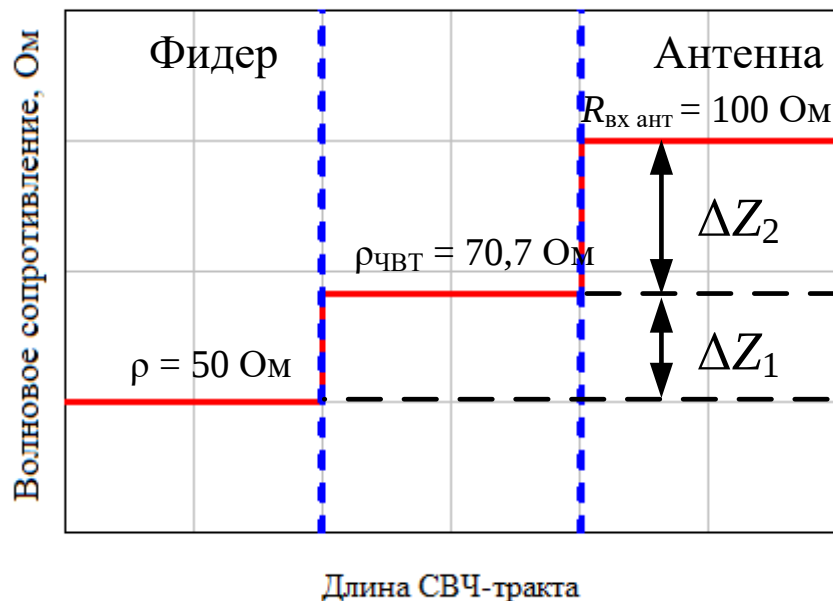


Рисунок 1.13 — Пояснение к возникновению перепадов импедансов для ЧВТ

Каждый из этих перепадов может рассматриваться как отдельная граница раздела сред. Поскольку уровень каждого перепада ниже, чем в СВЧ-тракте без согласования, то рассогласование в диапазоне частот будет проявляться меньше.

Таким образом, чтобы повысить относительную полосу согласования трансформатора, необходимо уменьшать возникающие перепады импедансов, как будет показано далее.

Можно показать, что относительная полоса согласования ЧВТ при трансформации чисто активной нагрузки зависит от соотношения $k_{\Delta Z} = Z_{\text{согл}}/\Delta Z$, где ΔZ — перепад согласуемых импедансов, и она может быть рассчитана как

$$\xi = \frac{\pi}{4} \cdot \arctg \left(\frac{2(K_{\text{СТУ доп}} - 1)}{K_{\text{СТУ доп}} + 1} \cdot \sqrt{k_{\Delta Z}(1 + k_{\Delta Z})} \right) \cdot 100 \%. \quad (1.21)$$

На рисунке 1.14 представлена зависимость относительной полосы согласования ЧВТ от соотношения $k_{\Delta Z}$ при условии, что принимается $Z_{\text{согл}} = 50$ Ом. Исходя из того, что на практике активная составляющая входного сопротивления антенны может принимать значения сотен ом, как показано на примере на рисунке 1.6 (~300—500 Ом), то относительная полоса согласования ЧВТ при зафиксированном во всей полосе частот $R_{\text{вх ант}} = 400$ Ом не превышает ~20 % в лучшем случае.

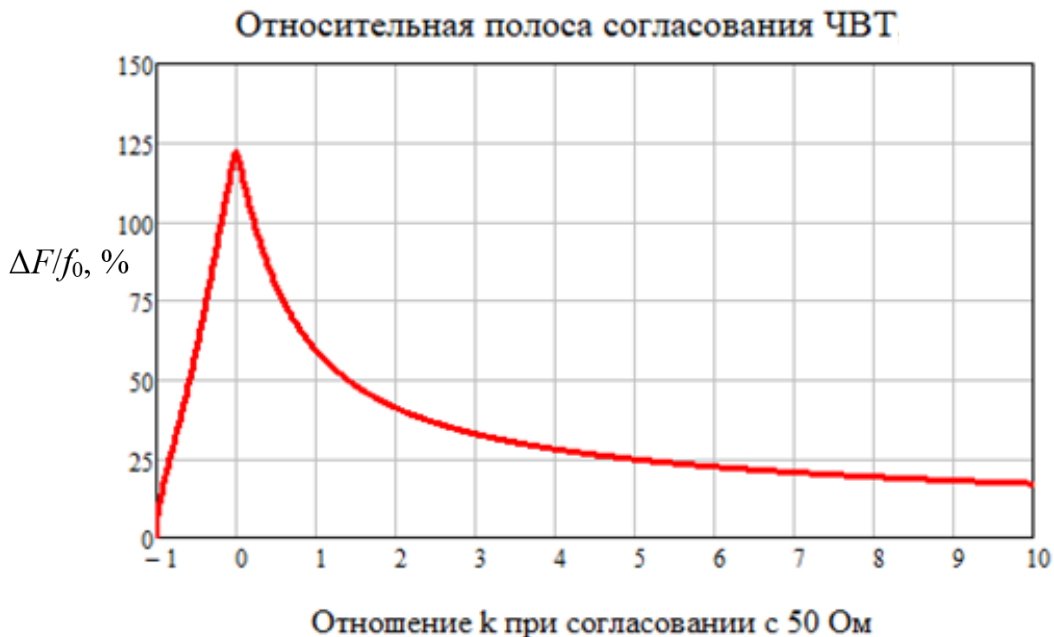


Рисунок 1.14 — Зависимость относительной полосы согласования ЧВТ от соотношения $k_{\Delta Z}$

1.2.5.2 Многоступенчатый четвертьволновый трансформатор

Исходя из всего выше сказанного, становится ясно, что для увеличения широкополосности СУ на основе трансформатора импеданса необходимо уменьшать перепад согласуемых импедансов ΔZ . Это становится возможным за счёт применения **многоступенчатых ЧВТ**, простейшим частным случаем которого является **двухступенчатый ЧВТ (ДЧВТ)**.

ДЧВТ представляет собой два последовательно подключенных ЧВТ — отдельные четвертьволновые отрезки ЧВТ1 и ЧВТ2, как показано на рисунке 1.15.

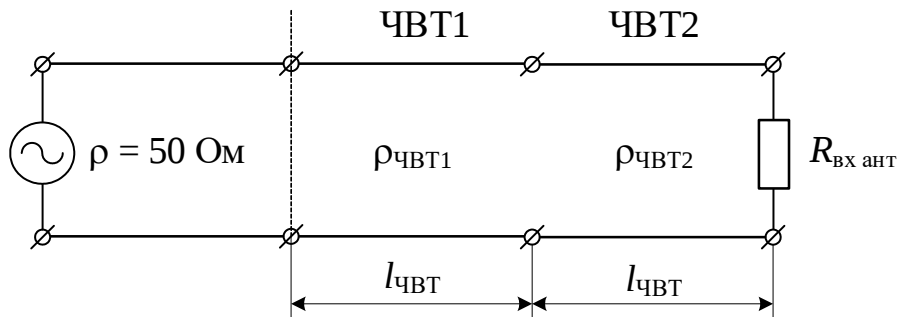


Рисунок 1.15 — Эквивалентная электрическая схема ДЧВТ

Принцип работы ДЧВТ, за счёт которого достигается увеличение относительной полосы согласования, состоит в следующем:

— **нагрузкой ЧВТ1 служит не антенна, а ЧВТ2**, входное сопротивление которого заведомо меньше (ближе к ρ) — $R_{\text{вх ЧВТ2}} < R_{\text{вх ант}}$;

— **источником для ЧВТ2 служит не фидер, а ЧВТ1**, выходное сопротивление которого заведомо больше (ближе к $R_{\text{вх ант}}$) — $R_{\text{вых ЧВТ1}} > \rho$.

ДЧВТ можно рассматривать как два **отдельно включенных СУ**, которые **согласуют меньшие перепады импедансов** (рисунок 1.16), за счёт чего и достигается повышение широкополосности.

Для того, чтобы достичь наибольшей широкополосности, волновые сопротивления отрезков ДЧВТ следует выбирать, исходя из следующих соотношений:

$$\rho_{\text{ЧВТ1}} = \sqrt{\rho \sqrt{\rho R_{\text{вх ант}}}}; \quad \rho_{\text{ЧВТ2}} = \sqrt{R_{\text{вх ант}} \sqrt{\rho R_{\text{вх ант}}}}. \quad (1.22)$$

Можно показать, что **относительная полоса согласования двухступенчатого ЧВТ** может быть рассчитана как

$$\xi = \frac{4}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{K_{\text{СТУ доп}} - 1}{K_{\text{СТУ доп}}}} \cdot \sqrt{k_{\Delta Z} (1 + k_{\Delta Z})} \cdot 100 \%. \quad (1.23)$$

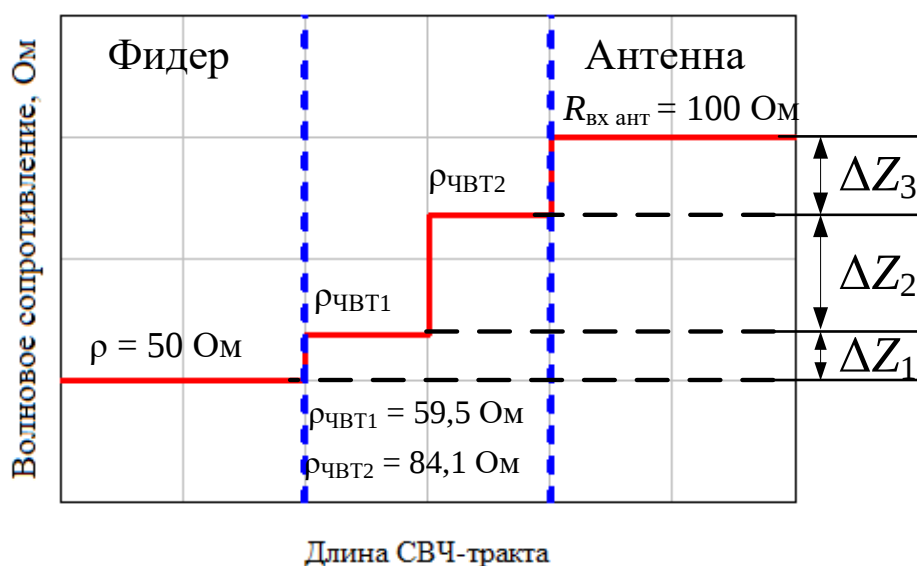


Рисунок 1.16 — Пояснение к уменьшению перепада импедансов для ДЧВТ

На рисунке 1.17 показано сравнение относительной полосы согласования двухступенчатого ЧВТ с одноступенчатым. Принимая, что сопротивление трансформатора не изменяется в диапазоне частот, выигрыш в полосе согласования составляет порядка 30—40 %, что позволяет считать двухступенчатый ЧВТ широкополосным СУ.

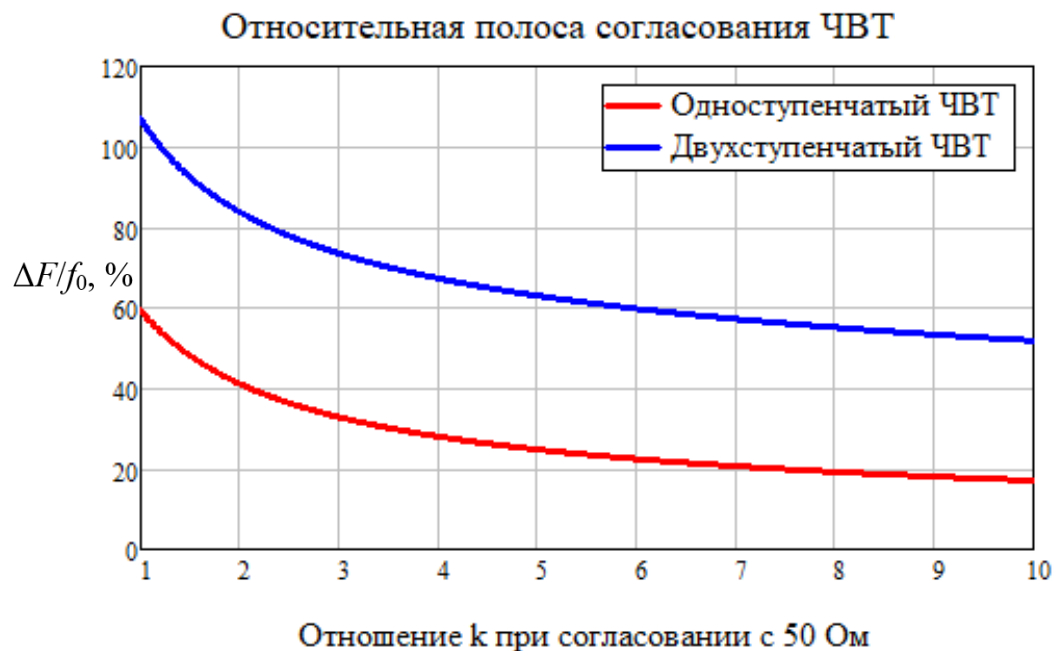


Рисунок 1.17 — Сравнение широкополосных согласующих свойств одноступенчатого и двухступенчатого ДЧВТ

Дальнейшее увеличение относительной полосы согласования возможно за счёт реализации большего количества ступеней. Тем не менее, реализация многоступенчатых ЧВТ с несколькими ступенями не является целесообразной из-за следующих причин:

- увеличение габаритных размеров СУ, из-за того, что каждый согласующий трансформатор должен иметь длину $\lambda/4$;
- понижение выигрыша от внедрения новых ступеней ЧВТ;
- сложность правильного расчёта волновых сопротивлений каждой из ступеней ЧВТ.

1.2.5.3 Трансформатор на основе плавного перехода

Более эффективные и компактные широкополосные и сверхширокополосные СУ можно реализовать на основе отрезков МЛП с **плавным изменением волнового сопротивления**, что соответствует плавному изменению ширины МЛП, как показано на рисунке 1.18.

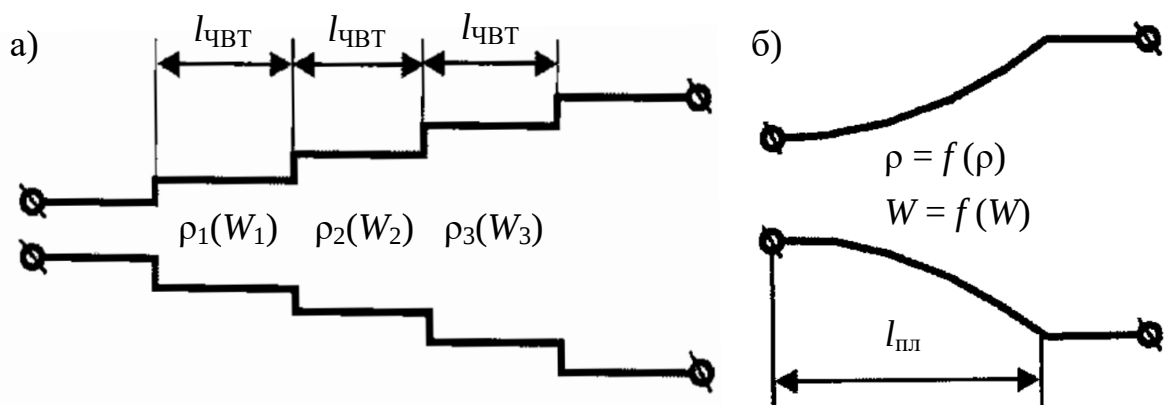


Рисунок 1.18 — Сравнение ступенчатых и плавных трансформаторов

Трансформаторы на основе плавных переходов обладают сравнительно наибольшей относительной полосой согласования, ввиду того, что в них имеют место **очень малые (плавные) перепады импеданса dZ** (рисунок 1.19). Поэтому в плавных трансформаторах роль играют не сами значения перепадов импеданса, а их профиль изменения, который и определяет итоговую широкополосность СУ.

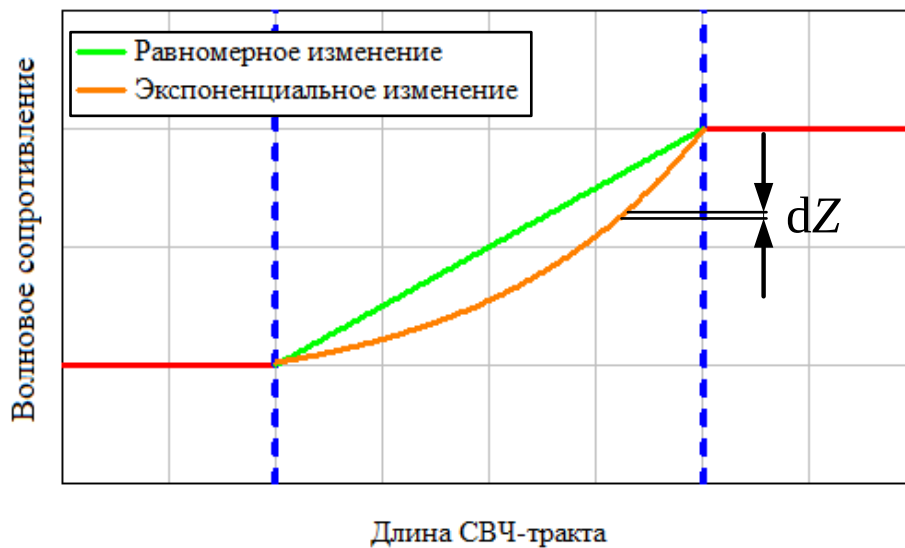


Рисунок 1.19 — Пояснение к принципу работы трансформаторов на основе плавных переходов

В зависимости от профиля изменения волнового сопротивления, различают несколько типов плавных трансформаторов:

- **трансформаторы с равномерным профилем**, которые являются конструктивно наиболее простыми, но и обладают наименьшей относительной полосой согласования;
- **трансформаторы с экспоненциальным профилем**, которые характеризуются весьма широкой относительной полосой согласования;
- **трансформаторы с полиномиальным профилем**, которые, как правило, синтезируются подобно фильтрам на основе полиномов высших порядков (Чебышева, эллиптический и др.) и обладают наиболее качественными характеристиками.

Важно понимать, что при проектировании плавных трансформаторов значительное влияние оказывает длина трансформатора, которая определяет **крутизну изменения волнового сопротивления** вдоль перехода. Для реализации сверхширокополосных трансформаторов **крутизну следует уменьшать, обеспечивая более плавный переход** на большей протяжённости отрезка МЛП. На практике с учётом реализуемого выигрыша и габаритных ограничений используют плавные СУ с длиной перехода от λ до 3λ .

1.2.6 Устройства для компенсации реактивных сопротивлений

Рассмотрим подключение фидера с выходным сопротивлением ρ к антенне, входное сопротивление которой имеет комплексный характер $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$ — случай **комплексной нагрузки**, который, как правило, практически всегда имеет место на практике.

В качестве СУ для компенсации реактивной составляющей может использоваться **реактивный параллельный шлейф** — отрезок ЛП с волновым сопротивлением $\rho_{\text{КШ}}$, подключаемый параллельно к СВЧ-тракту. В зависимости от сопротивления, на которое параллельный шлейф может быть нагружен на конце отрезка, различают два типа СУ:

— **короткозамкнутый шунт (КШ)** — параллельный шлейф, нагруженный на конце **на короткое замыкание (КЗ)** $R_{\text{н КШ}} = 0 \text{ Ом}$ (рисунок 1.20, а);

— **разомкнутый шлейф (РШ)** — параллельный шлейф, нагруженный на конце **на холостой ход (ХХ)** $R_{\text{н РШ}} = \infty$ (рисунок 1.20, б).

Особенность параллельного шлейфа любого типа состоит в том, что его входное сопротивление $X_{\text{шл}}$ имеет чисто реактивный характер, которое путём подбора длины шлейфа $l_{\text{шл}}$ может принимать любые значения с любым знаком.

Волновое сопротивление параллельного шлейфа рекомендуется выбирать, исходя из соотношения

$$\rho_{\text{КШ}} = \rho_{\text{РШ}} = \rho \cdot \sqrt{2}. \quad (1.24)$$

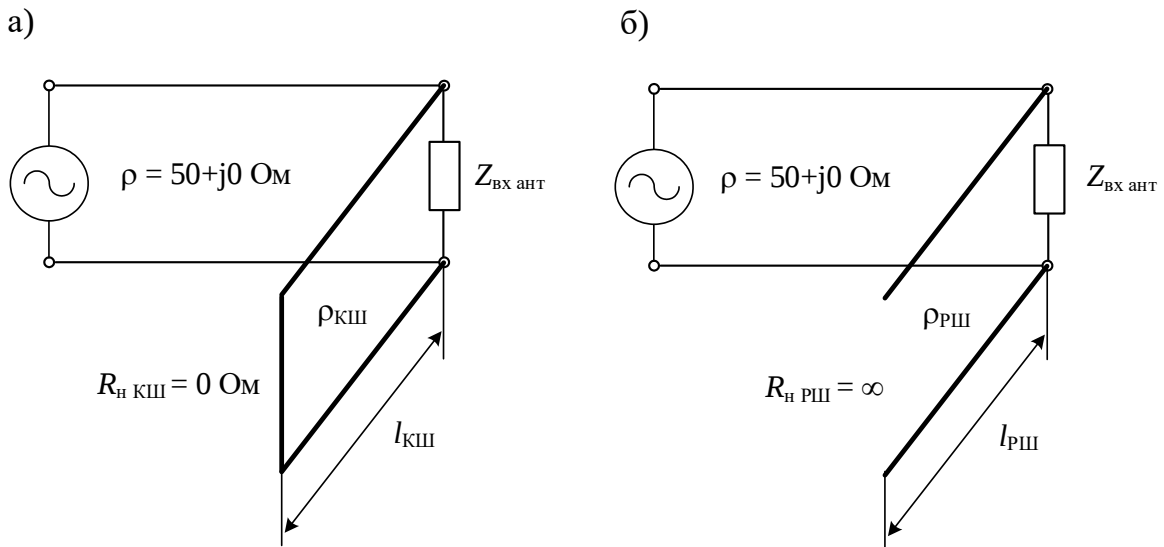


Рисунок 1.20 — Эквивалентные электрические схемы включения согласующих параллельных шлейфов: короткозамкнутого шунта (а) и разомкнутого шлейфа (б)

Реактивные сопротивления КШ и РШ определяются через их волновые сопротивления как

$$\begin{aligned} X_{\text{КШ}}(l_{\text{шл}}) &= -j\rho_{\text{КШ}} \cdot \text{ctg}(k \cdot l_{\text{шл}}); \\ X_{\text{РШ}}(l_{\text{шл}}) &= j\rho_{\text{РШ}} \cdot \text{tg}(k \cdot l_{\text{шл}}). \end{aligned} \quad (1.25)$$

Анализ этих выражений (рисунок 1.21) при одинаковых значениях длины шлейфа $l_{\text{шл}}$ показывает, что:

- реактивные сопротивления КШ и РШ имеют противоположные знаки;
- при малых сопротивлениях КШ сопротивление РШ будет велико, и наоборот;
- характеры изменения сопротивлений КШ и РШ повторяют друг друга со сдвигом на четверть длины волны $\lambda/4$.

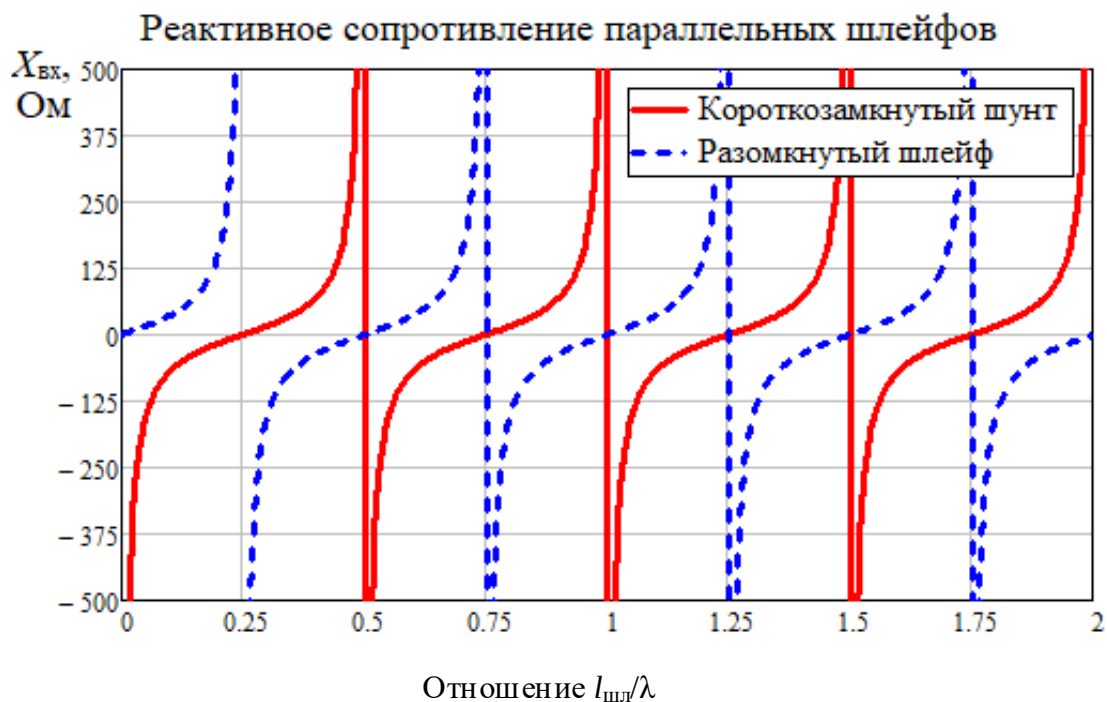


Рисунок 1.21 — Сравнение зависимостей реактивных сопротивлений параллельных шлейфов разных типов от длины шлейфа

Выбирая длину согласующего параллельного шлейфа, можно достичь равенства с противоположным реактивным сопротивлением антенны на центральной частоте согласования, что и позволяет осуществить его компенсацию (рисунки 1.22—1.23).

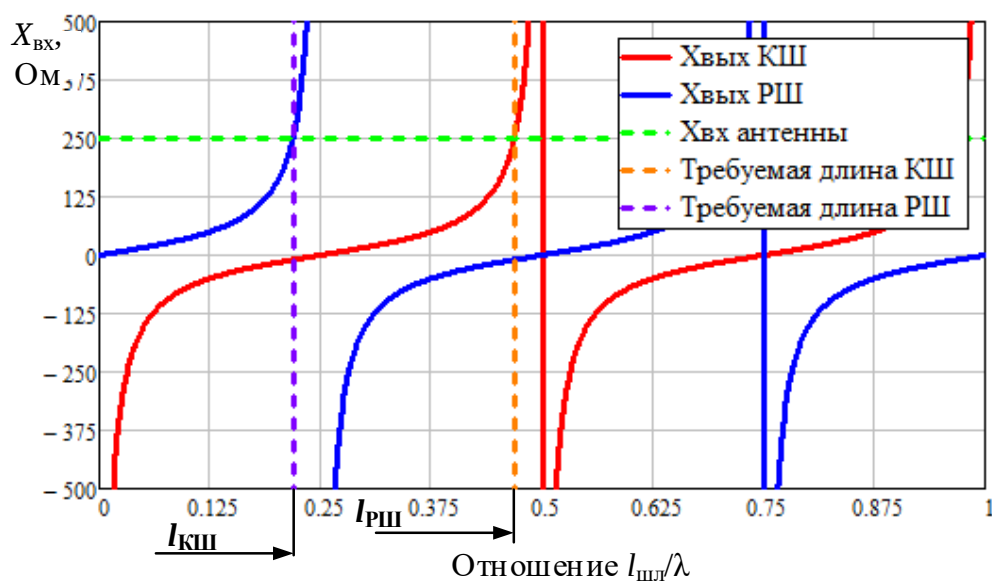


Рисунок 1.22 — Пояснение к примеру определению требуемой длины согласующего параллельного шлейфа при компенсации $X_{\text{вх ант}} = -250 \text{ Ом}$ ($l_{\text{КШ}} = 0,03 \text{ мм}$; $l_{\text{РШ}} = 0,28 \text{ мм}$)

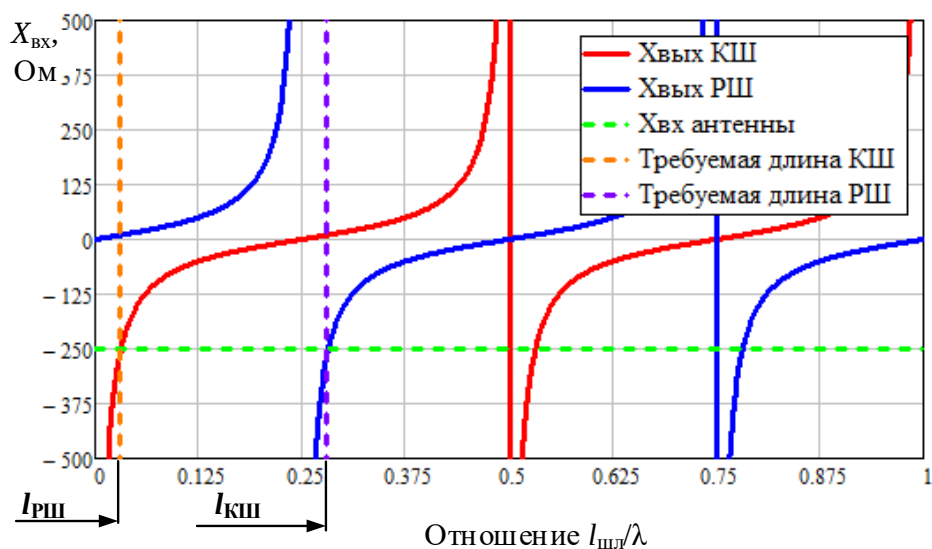


Рисунок 1.23 — Пояснение к примеру определению требуемой длины согласующего параллельного шлейфа при компенсации $X_{\text{вх ант}} = 250 \text{ Ом}$ ($l_{\text{КШ}} = 0,47 \text{ мм}$; $l_{\text{РШ}} = 0,22 \text{ мм}$)

Аналитически требуемую длину согласующего параллельного шлейфа можно определить, получив из (1.25) следующие выражения:

$$\begin{aligned}
 l_{\text{КШ}} &= \frac{1}{k} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{X_{\text{вх ант}}}{\rho} \right); \\
 l_{\text{РШ}} &= \frac{1}{k} \cdot \operatorname{arctg} \left(-\frac{\rho}{X_{\text{вх ант}}} \right).
 \end{aligned}
 \tag{1.26}$$

В случае, если расчётное требуемое значение длины параллельного шлейфа (1.26) получается отрицательным, к нему следует прибавить половину длины волны $\lambda/2$.

Примеры вида топологии параллельных шлейфов разных типов на основе отрезков МЛП представлены на рисунке 1.24. Необходимо отметить следующие особенности их реализации:

— КШ являются более простыми с точки зрения их конструктивного исполнения (рисунок 1.24, а): короткое замыкание на конце отрезка с высокой точностью может быть реализовано путём подключения МЛП к нижней обкладке с помощью сквозной металлизации (**электрическое заземление**);

— РШ выполняются путём размыкания МЛП на конце (рисунок 1.24, б) — вместо проводящей стенки линия заканчивается переходом в свободное пространство (**воздух**); технологически реализация такого холостого хода сложнее, и она обладает недостатками эффектов краевой ёмкости и небольшого излучения открытого конца МЛП.

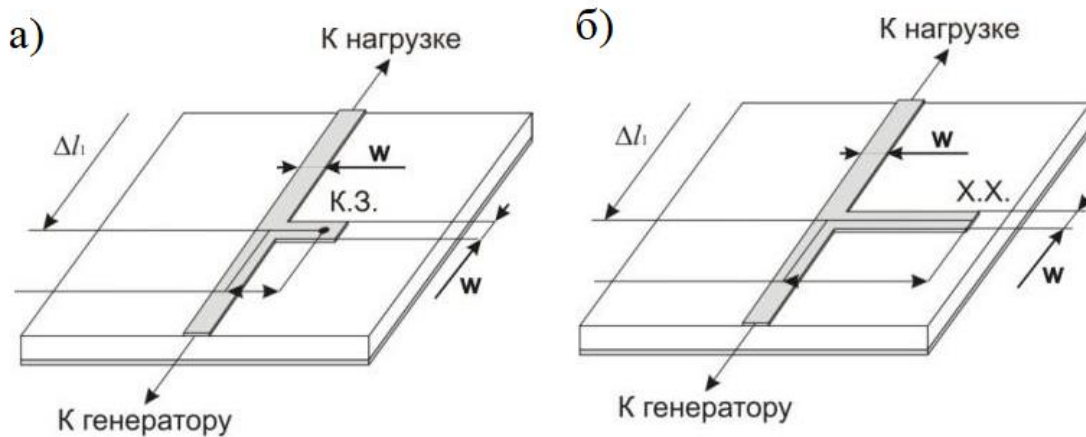


Рисунок 1.24 — Вид топологии короткозамкнутого шунта (а) и разомкнутого шлейфа (б)

Исходя из всего выше сказанного, можно сделать выводы о применимости СУ на основе параллельных шлейфов:

— параллельные реактивные шлейфы могут применяться в качестве СУ для компенсации реактивного сопротивления нагрузки;

— для компенсации положительного реактивного сопротивления больше подходят РШ за счёт меньшей требуемой длины шлейфа, однако их исполнение является более сложным;

— для компенсации отрицательного реактивного сопротивления больше подходят КШ за счёт меньшей требуемой длины шунта.

В случае, если требуется реализовать компенсацию реактивного сопротивления в широкой полосе частот, можно показать, что большей относительной полосой согласования обладают СУ на основе короткозамкнутых шунтов, что в совокупности с простотой реализации определило их широкое распространение на практике.

1.2.7 Устройства для согласования комплексных сопротивлений

Для того, чтобы в полной мере согласовать антенну с фидером, необходимо использовать СУ, которое сочетает в себе сразу оба принципа:

- согласование активных сопротивлений за счёт трансформации или правильного подбора точки включения;
- компенсация реактивных сопротивлений.

Простейшего согласования комплексного сопротивления антенны можно добиться путём применения **параллельного шлейфа, подключенного на определённом расстоянии от нагрузки (антенны)**, как показано на рисунке 1.25.

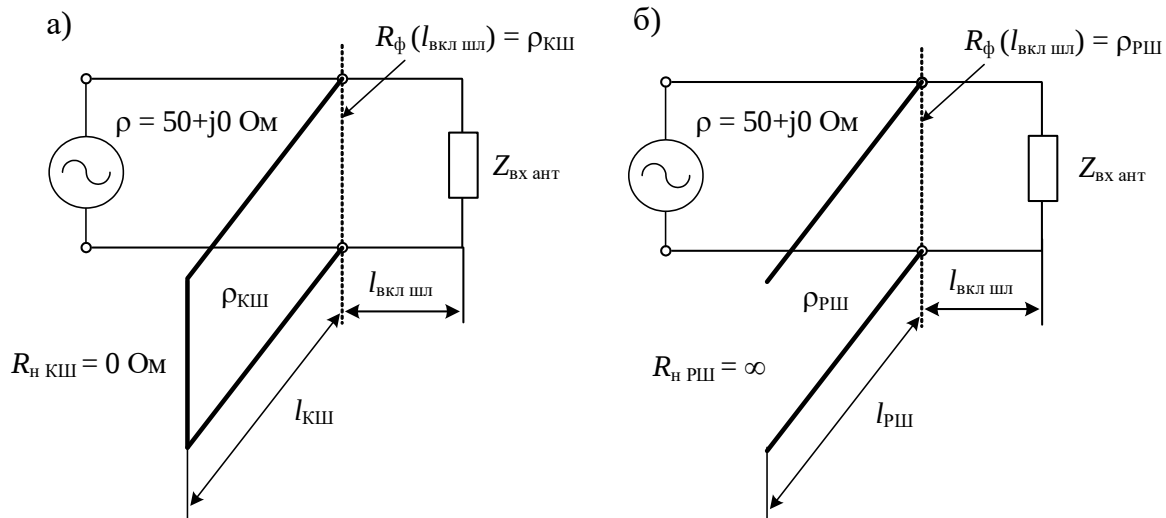


Рисунок 1.25 — Эквивалентные электрические схемы включения параллельных шлейфов для согласования комплексных сопротивлений

При таком включении параллельный шлейф нужно согласовывать не с комплексной проводимостью антенны $Y_{\text{вх ант}}$ непосредственно, а с комплексной проводимостью в сечении ЛП на расстоянии от нагрузки $l_{\text{вкл шл}}$, т.е. необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} G_{\text{вх шл}} = G_{\text{ф}}(l_{\text{вкл шл}}) = \text{Re}(1/Z_{\text{ф}}(l_{\text{вкл шл}})); \\ B_{\text{вх шл}} = -B_{\text{ф}}(l_{\text{вкл шл}}) = \text{Im}(1/Z_{\text{ф}}(l_{\text{вкл шл}})). \end{cases} \quad (1.27)$$

Используя выражение для распределения комплексного сопротивления вдоль ЛП (1.1), можно вывести из (1.27) **требуемое расстояние от нагрузки для включения КШ и РШ** соответственно:

$$\begin{aligned} l_{\text{вкл КШ}} &= \frac{1}{k} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{X_{\text{вх ант}}}{R_{\text{вх ант}} - \rho} + \alpha \right); \\ l_{\text{вкл РШ}} &= \frac{1}{k} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{\rho - R_{\text{вх ант}}}{X_{\text{вх ант}}} - \alpha \right), \end{aligned} \quad (1.28)$$

где величина α определяется из выражения

$$\alpha = \sqrt{\frac{X_{\text{вх ант}}^2}{(R_{\text{вх ант}} - \rho)^2} + \frac{R_{\text{вх ант}}^2 + X_{\text{вх ант}}^2 - \rho R_{\text{вх ант}}}{\rho(R_{\text{вх ант}} - \rho)}}. \quad (1.29)$$

В свою очередь, расчётные значения **требуемой длины КШ и РШ** можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} l_{\text{КШ}} &= \frac{1}{k} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{Z_{\phi}(l_{\text{вкл КШ}})}{\rho} \right); \\ l_{\text{РШ}} &= \frac{1}{k} \cdot \operatorname{arctg} \left(-\frac{\rho}{Z_{\phi}(l_{\text{вкл РШ}})} \right). \end{aligned} \quad (1.30)$$

В случае, если расчётное требуемое значение длины (1.30) получается отрицательным, к нему следует прибавить половину длины волны $\lambda/2$.

Комплексное сопротивление антенны может быть согласовано в узкой полосе частот с применением простейшего трансформатора активных сопротивлений на основе **ЧВТ**, который включается на расстоянии от нагрузки $l_{\text{вкл ЧВТ}}$ **в сечении фидера**, где реактивная составляющая сопротивления фидера обращается в ноль (рисунок 1.26).

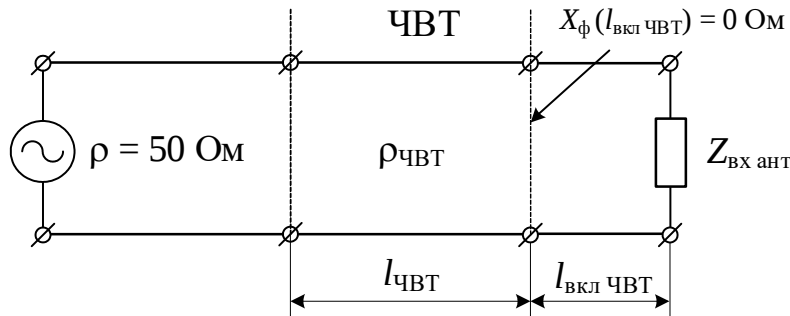


Рисунок 1.26 — Эквивалентная электрическая схема включения ЧВТ для согласования комплексного сопротивления антенны

Из (1.1) можно выразить расстояние от нагрузки, в которое следует подключить ЧВТ для наилучшего согласования с комплексной нагрузкой

$$l_{\text{вкл ЧВТ}} = \frac{\Psi_{\text{вкл ЧВТ}}}{4\pi} \lambda, \quad (1.31)$$

где $\Psi_{\text{вкл ЧВТ}}$ — аргумент ККО в точке, соответствующей подключению ЧВТ, который определяется как

$$\Psi_{\text{вкл ЧВТ}} = \begin{cases} \arctg\left(\frac{X_{\text{вх ант}}}{R_{\text{вх ант}} - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_{\text{вх ант}}}{R_{\text{вх ант}} + \rho}\right), & \text{при } R_{\text{вх ант}} > \rho; \\ \pi - \arctg\left(\frac{X_{\text{вх ант}}}{R_{\text{вх ант}} - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_{\text{вх ант}}}{R_{\text{вх ант}} + \rho}\right), & \text{при } R_{\text{вх ант}} < \rho, X_{\text{вх ант}} > 0; \\ \pi + \arctg\left(\frac{X_{\text{вх ант}}}{R_{\text{вх ант}} - \rho}\right) - \arctg\left(\frac{X_{\text{вх ант}}}{R_{\text{вх ант}} + \rho}\right), & \text{при } R_{\text{вх ант}} < \rho, X_{\text{вх ант}} < 0. \end{cases} \quad (1.32)$$

Необходимо учесть, что при таком включении ЧВТ необходимо согласовывать не с комплексным сопротивлением антенны $Z_{\text{вх ант}}$ непосредственно, а с комплексным сопротивлением в сечении фидера на расстоянии от нагрузки $l_{\text{вкл ЧВТ}}$

$$\begin{cases} R_{\text{вых ЧВТ}} = R_{\phi}(l_{\text{вкл ЧВТ}}) = \text{Re}(Z_{\phi}(l_{\text{вкл ЧВТ}})); \\ X_{\text{вых ЧВТ}} = X_{\phi}(l_{\text{вкл ЧВТ}}) = 0. \end{cases} \quad (1.33)$$

Таким образом, волновое сопротивление ЧВТ при согласовании комплексной нагрузки рассчитывается как

$$\rho_{\text{ЧВТ}} = \sqrt{\rho \cdot R_{\text{вых ЧВТ}}}. \quad (1.34)$$

Наилучшего согласования можно достичь путём **совмещения СУ для трансформации активного и компенсации реактивного сопротивлений**, например, за счёт совместного применения **ЧВТ с согласующим параллельным шлейфом**.

Подключение согласующего параллельного шлейфа можно осуществлять двумя способами:

— непосредственно в сечении нагрузки (рисунок 1.27, а), что может быть весьма неудобно с конструктивной точки зрения;

— **непосредственно в сечении подключения ЧВТ** (рисунок 1.27, б), что находит более широкое применение на практике.

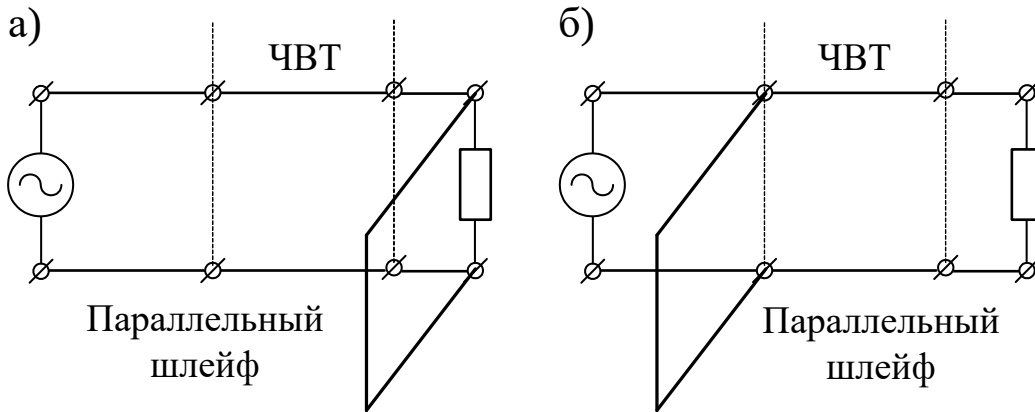


Рисунок 1.27 — Эквивалентные электрические схемы двух способов включения согласующего параллельного шлейфа

В зависимости от соотношения между согласуемыми активными сопротивлениями, в качестве согласующего параллельного шлейфа следует выбирать либо КШ, либо РШ (рисунок 1.28), причём их длина $l_{\text{КШ}}$ или $l_{\text{РШ}}$ выбирается равной четверти длины волны $\lambda/4$.

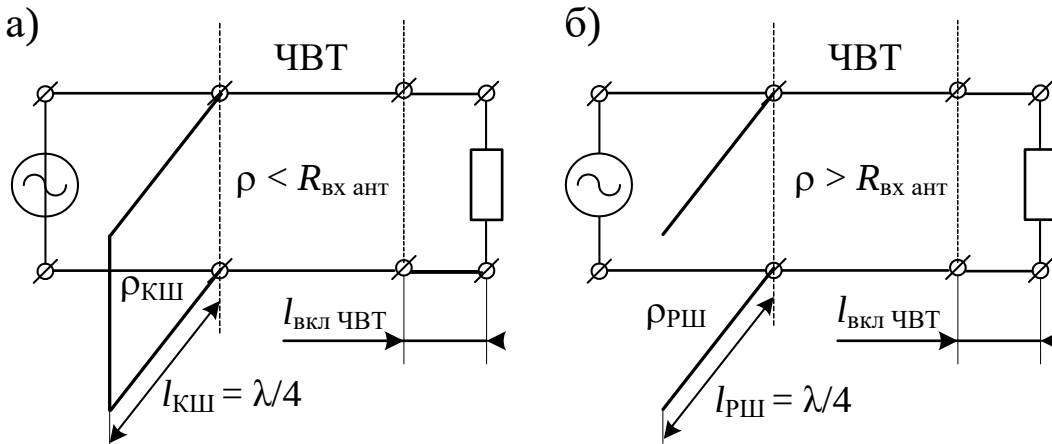


Рисунок 1.28 — Эквивалентные электрические схемы включения

Расчёт расстояния от нагрузки для подключения ЧВТ $l_{\text{вкл ЧВТ}}$ следует осуществлять по формулам (1.31)—(1.32).

Для определения требуемого волнового сопротивления параллельного шлейфа можно воспользоваться соотношениями

$$\begin{aligned} \rho_{\text{КШ}} &= \sqrt{\rho R_{\text{вых ЧВТ}}} \cdot \frac{\rho}{R_{\text{вых ЧВТ}} - \rho}; \\ \rho_{\text{РШ}} &= \sqrt{\frac{R_{\text{вых ЧВТ}}}{\rho}} \cdot (\rho - R_{\text{вых ЧВТ}}). \end{aligned} \quad (1.35)$$

Отметим, что все возможные реализации устройств для согласования антенн реализуются на основе представленных ранее типов СУ, а также их различных комбинаций.

1.2.8 Особенности широкополосного согласования антенн

Пример расчёта входного сопротивления полуволнового симметричного вибратора, показанный ранее на рисунке 1.2, демонстрирует возможность значительного изменения значений активного и реактивного сопротивлений антенны в диапазоне частот. Основная сложность при осуществлении согласования в широкой полосе частот заключается в **таком подборе комбинации СУ, которая будет обеспечивать трансформацию активного и компенсацию реактивного сопротивлений в широкой полосе частот**, соответствуя с достаточной точностью (повторяя) частотным зависимостям $R_{\text{вх ант}}(f)$ и $X_{\text{вх ант}}(f)$.

На рисунке 1.29 представлены частотные зависимости несогласованных полуволновых симметричных вибраторов А1 и А2 с разным диаметром плеч антенны, что существенно повлияло на степень разброса сопротивления антенны.

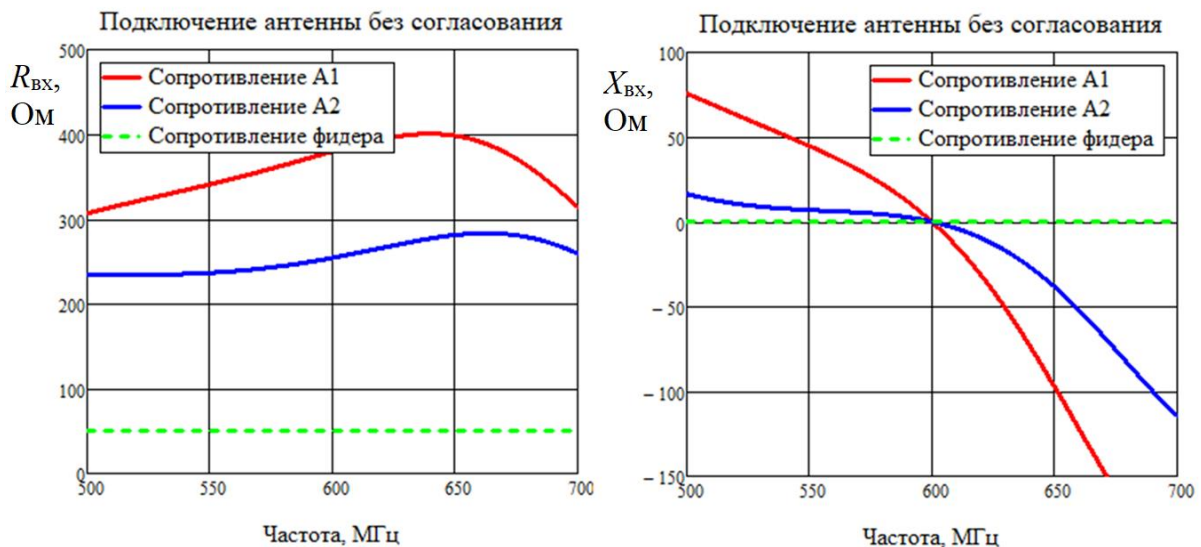


Рисунок 1.29 — Изменение входного сопротивления А1 и А2

Сравним два варианта изменения значения входного сопротивления антенны в диапазоне частот 500 — 700 МГц:

— активное сопротивление:

- 1) для антенны А1 $R_{\text{вх А1}} \approx 300 — 400$ Ом;
- 2) для антенны А2 $R_{\text{вх А2}} \approx 230 — 280$ Ом;

— реактивное сопротивление:

- 1) для антенны А1 $X_{\text{вх А1}} \approx -200 — 100$ Ом;
- 2) для антенны А2 $R_{\text{вх А2}} \approx -120 — 20$ Ом.

Нетрудно показать, что **осуществить широкополосное согласование антенны А2 значительно проще**, поскольку разброс значений сопротивлений, которые необходимо согласовывать с фидером, значительно меньше. Это значит, что СУ — трансформаторы импеданса и реактивные компенсаторы — более эффективно реализуют согласование с сопротивлением фидера $Z_{\text{вых ф}} = (50 + j0) \text{ Ом}$.

Таким образом, при проектировании широкополосных и сверхширокополосных антенн **необходимо решать задачу их согласования в заданном диапазоне частот ещё на стадии проектирования непосредственно самих антенных излучателей**. Если это возможно, при разработке конструкции антенны следует предусмотреть такие геометрические параметры и конструктивные решения, которые могли бы обеспечить более равномерный разброс входного сопротивления антенны при возможном незначительном ухудшении характеристик излучения антенны.

Современные средства проектирования антенн и устройств СВЧ достигли такого развития, что в общем случае СУ могут быть **синтезированы**, т.е. разработаны автоматически на основании:

- заданных критериев согласования — $K_{\text{СТУ доп}}$ или $\Gamma_{\text{доп}}$;
- заданного набора допустимых СУ — из каких типов СУ с заданными ограничениями длины/ширины МЛП могут быть разработаны составные комбинации СУ;
- заданного алгоритма синтеза — в зависимости от выбранного типа алгоритма могут быть получены различные топологии СУ, которые с разной эффективностью и разными габаритными размерами обеспечивают требуемое согласование.

1.2.9 Общие сведения о САПР *AWR Microwave Office*

Для моделирования различных устройств СВЧ диапазона могут использоваться различные средства автоматизированного проектирования (САПР). К наиболее популярным из них относят две группы САПР:

- *Cadence AWR Design Environment*;
- *Keysight Advanced Design System*.

В рамках данной лабораторной работы моделирование будет осуществляться в САПР ***AWR Microwave Office (MWO)***, который является составной частью группы *AWR Design Environment*, включающей в себя также пакеты для электродинамического анализа двух/трёхмерных структур и моделирования устройств СВЧ на системном уровне.

MWO представляет собой достаточно удобную среду схемотехнического моделирования СВЧ-устройств, в которой реализована возможность задания параметров устройств через переменные и уравнения, что позволяет гибким образом осуществлять подстройку и корректировку параметров.

После первого запуска программы возникает окно выбора опций запуска, в котором следует указать «*Always run with the selected features*» и нажать **ОК**, как показано на рисунке 1.30, после чего данное окно будет пропускаться при запуске.

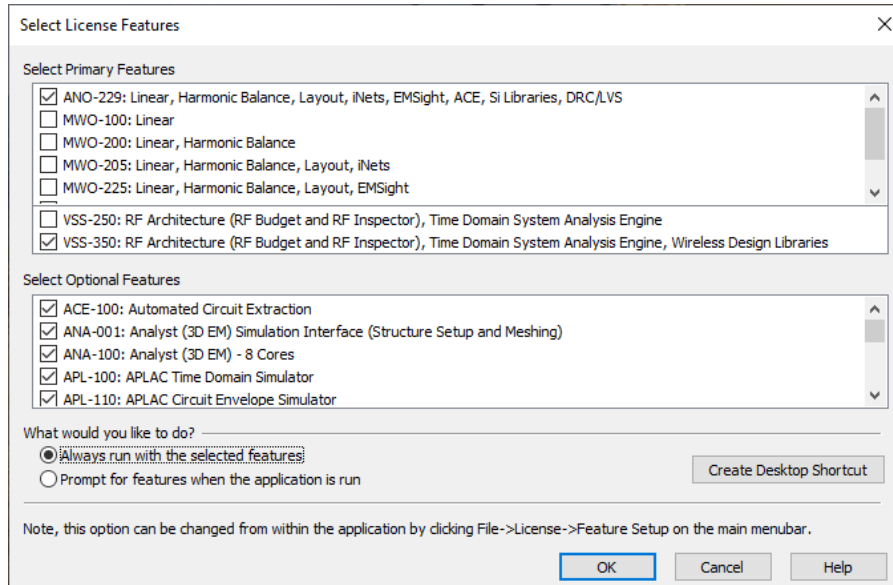


Рисунок 1.30 — Вид окна выбора опций запуска

На рисунке 1.31 показан вид окна *MWO* после запуска программы, на котором условно обозначены следующие элементы интерфейса:

- 1 — **панель инструментов**, посредством которой осуществляется основное управление файлом программы, настройкой проекта, запуском анализа и других вспомогательных инструментов;
- 2 — **окно управления проектом**, с помощью которого осуществляется управления опциями проекта, переключение между электрическими схемами, топологиями и др.;
- 3 — **окно проектирования**, в котором пользователи непосредственно проектируют модели микроволновых устройств;
- 4 — **навигация между панелями** управления проектом, схематическими элементами и топологией;
- 5 — **окно статуса моделирования**, в которое выводится содержимое лог-файлов результатов моделирования с указанием возможных предупреждений (*Warnings*) и ошибок (*Errors*).

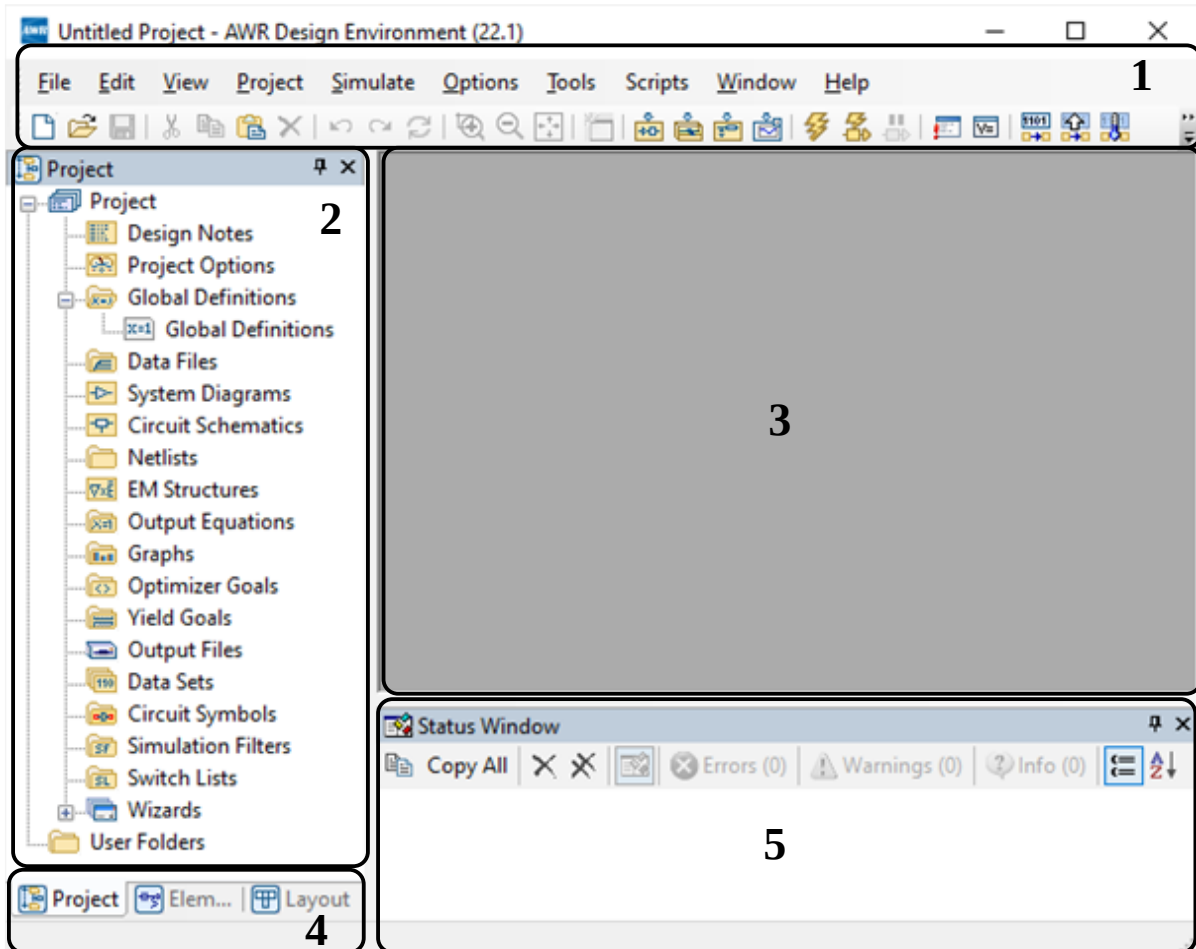


Рисунок 1.31 — Вид окна *MWO* с указанием основных элементов интерфейса

Перечислим некоторые инструменты панели 1, которые могут представлять интерес при использовании программы:

— **File** — инструменты для открытия, импорта и сохранения проектов; используя *Open Example*, можно открыть один из множества встроенных примеров *MWO*, которые демонстрируют возможности проектирования и готовые модели;

— **View** — инструменты для управления отображением элементов интерфейса программы; в случае, если случайно было закрыто какое-либо из нужных окон интерфейса, следует использовать эту группу инструментов;

— **Project** — инструменты для управления проектом, создания новых схем, системных моделей и др., а также для управления измерениями, графиками, оптимизацией и подключения технологической библиотеки;

— **Simulate** — инструменты для управления симуляцией проектов, их оптимизацией и корректировкой параметров;

— **Options** — инструменты для настройки опций файла, проектов и др.;

— **Tools** — некоторые специализированные инструменты проектирования, включая калькулятор для расчёта параметров СВЧ ЛП *TXLine*;

— **Help** — инструменты вызова внутреннего справочника *MWO*, содержащего сведения для освоения программы, а также сведения об аналитических моделях, заложенных в компоненты, и особенностях их использования.

Окно управления проектами 2 частично дублирует функции с панели инструментов *Project* и представляет более наглядную визуальную структуру дерева проекта. Перечислим некоторые его элементы:

— **Global Definitions** — поле, которое является глобальным для всех элементов проекта; благодаря этому в нём могут быть объявлены какие-то глобальные переменные, компоненты и др., к которым будут иметь доступ любые схемы и модели внутри проекта;

— **Output Equations** — инструменты для управления уравнениями, которые могут использовать результаты моделирования для аналитического расчёта каких-либо других зависимостей;

— **User Folders** — пользовательские папки, в которые могут для удобства навигации помещаться схемы, измерения и графики, объединяемые некоторой пользовательской логикой проектирования, что особенно полезно для проектов с множеством вложенных элементов.

В меню *Project Options* пользователь может выполнять следующую настройку:

— **Global Units** — настройка стандартных единиц измерения величин в пределах проекта;

— **Frequencies** — настройка диапазона частот, в котором проект или отдельные его части подлежат моделированию (рисунок 1.32).

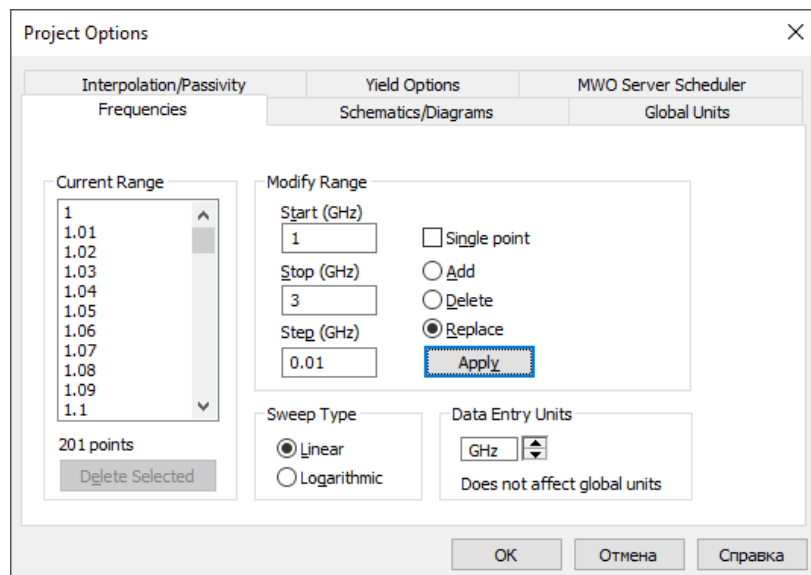


Рисунок 1.32 — Вид окна настройки диапазона частот моделирования проекта (в данном примере от 1 до 3 ГГц с шагом 0,01 ГГц)

Примечание. Отдельные схемы в рамках проекта могут быть настроены для моделирования в других диапазонах частот через меню для их собственных настроек. По умолчанию, если не указать обратного, все схемы моделируются в глобальном диапазоне частот для всего проекта.

Диапазон частот моделирования задаётся в формате **Start — Stop — Step**, где указываются начальная, конечная частота моделирования, а также шаг частоты соответственно.

Особый интерес при проектировании микроволновых устройств представляет использование специализированного калькулятора **TXLine**, который вызывается в **MWO** через **Tools — TXLine** и имеет внешний вид окна, как показано на рисунке 1.33.

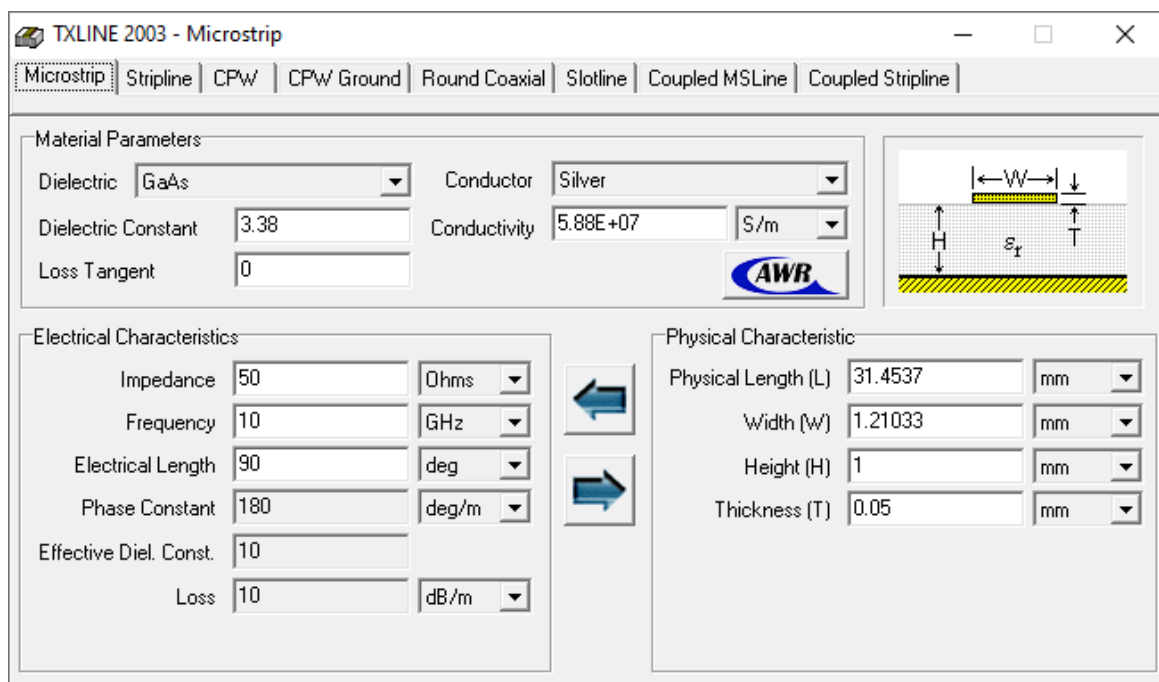


Рисунок 1.33 — Вид окна калькулятора для расчёта СВЧ ЛП **TXLine**

TXLine позволяет с высокой точностью рассчитать **физические параметры** (*Physical Characteristic*) — **длину отрезка МЛП** (*Physical Length (L)*) и его **ширину** (*Width (W)*) — на основании следующих заданных параметров:

- материал диэлектрика (***Dielectric***), выбираемый из ряда заданных;
- относительная диэлектрическая проницаемость подложки (***Dielectric Constant***);
- тангенс угла диэлектрических потерь (***Loss Tangent***);
- материал проводника (***Conductor***), выбираемый из ряда заданных;
- проводимость проводника (***Conductivity***);
- волновое сопротивление МЛП (***Impedance***);
- центральная частота, для которой в соответствии с (1.13) определяется длина волны λ (***Frequency***);

— электрическая длина (**Electrical Length**) — отношение физической длины отрезка МЛП к длине волны, выраженное в градусах по формуле:

$$\theta_{\text{эл}} = \frac{l_{\text{МЛП}}}{\lambda} \cdot 360^\circ; \quad (1.36)$$

— толщина подложки (**Height**);

— толщина проводника МЛП (**Thickness**).

При необходимости калькулятор позволяет осуществить расчёт от обратного: зная длину $l_{\text{МЛП}}$ и ширину W отрезка МЛП, а также рабочую частоту f_0 , можно определить соответствующие отрезку МЛП электрическую длину $\theta_{\text{эл}}$ и волновое сопротивление ρ .

1.3 Постановка индивидуального задания

К фидеру, волновое сопротивление которого составляет ρ , подключается антенна, входное сопротивление является постоянным и равняется $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$. Для согласования антенны с фидером на частоте f_0 по критерию $K_{\text{СТУ}} \leq K_{\text{СТУ доп}}$ между ними подключается СУ на основе МЛП, толщина проводника которых равна T . Диэлектрическая подложка толщиной H имеет относительную диэлектрическую проницаемость ϵ , которая равна её эффективному значению $\epsilon_{\text{эфф}}$, а тангенс угла диэлектрических потерь составляет $\text{tg}(\sigma)$.

Исходные данные для выполнения лабораторной работы рассчитываются, исходя из предпоследней M и последней N цифр зачётной книжки, как показано в таблицах 1.1—1.2.

Таблица 1.1 — Исходные данные для выполнения работы

Исходный параметр	Обозн.	Расчёт параметра	Ед. изм.
Волновое сопротивление фидера	ρ	50	Ом
Активная составляющая входного сопротивления антенны	$R_{\text{вх ант}}$	$100 + 2 \cdot (M + 10 \cdot N)$	Ом
Реактивная составляющая входного сопротивления антенны	$X_{\text{вх ант}}$	$10 \cdot (10 + M + N)$	Ом
Допустимое значение КСВ	$K_{\text{СТУ}}$	$1,3 + 0,05 \cdot (M + N)$	ед.
Центральная частота	f_0	$1 + 0,2 \cdot (M + N)$	ГГц

Таблица 1.2 — Данные для выбора материала подложки

<i>N</i>	Материал подложки	ϵ	<i>H</i> , мм	$\text{tg}(\sigma)$
0	FR-4	4,5	1,575	0,0021
1	ФЛАН-2,8	2,8	1,000	0,0015
2	ФАФ-4Д	3,0	1,500	0,0010
3	Rogers RT/Duroid 5880	2,2	0,508	0,0009
4	Relong RC250	2,5	2,500	0,0014
5	Wangling TP-1/2	6,0	1,500	0,0010
6	Alumina (Al_2O_3)	9,8	0,508	0,0002
7	Taconic CER-10	10,0	1,575	0,0035
8	Rogers RO3003	3,0	0,787	0,0013
9	Arlon AD430	4,3	0,254	0,0030

Для случаев, представленных в таблице 1.3, необходимо осуществить расчёт параметров СУ, а также осуществить их моделирование в *AWR Microwave Office* и на основании измерений рассчитать относительную полосу согласования ξ .

Таблица 1.3 — Перечень СУ и случаев нагрузки, исследуемых в работе

№	Тип СУ	Сопротивление нагрузки $Z_{\text{вх ант}}$
1.1	Четвертьволновый трансформатор	$R_{\text{вх ант}} + j0$
1.2		$2 \cdot R_{\text{вх ант}} + j0$
1.3		$R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$
2.1	Двухступенчатый четвертьволновый трансформатор	$R_{\text{вх ант}} + j0$
2.2		$R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$
3.1	Трансформатор на основе плавного перехода (с линейным профилем) (для чётных вариантов <i>N</i>)	$0,5 \cdot R_{\text{вх ант}} + j0$
3.2	Трансформатор на основе плавного перехода (с экспоненциальным профилем) (для нечётных вариантов <i>N</i>)	$0,5 \cdot R_{\text{вх ант}} + j0$
4.1	Короткозамкнутый шунт (для чётных вариантов <i>N</i>)	$R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$
4.2		$R_{\text{вх ант}} - jX_{\text{вх ант}}$
4.3	Разомкнутый шлейф (для нечётных вариантов <i>N</i>)	$R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$
4.4		$R_{\text{вх ант}} - jX_{\text{вх ант}}$
5.1	Четвертьволновый трансформатор с короткозамкнутым шунтом (для нечётных вариантов <i>N</i>)	$R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$
5.2		$R_{\text{вх ант}} - jX_{\text{вх ант}}$
5.3	Четвертьволновый трансформатор с разомкнутым шлейфом (для чётных вариантов <i>N</i>)	$R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$
5.4		$R_{\text{вх ант}} - jX_{\text{вх ант}}$

Для всех исследуемых СУ в ходе моделирования необходимо следующие графические зависимости в диапазоне частот ($0,5 \cdot f_0 \dots 1,5 \cdot f_0$):

- частотная зависимость КСВ — $K_{STU}(f)$;
- частотная зависимость коэффициента передачи со входа на выход (параметр S_{21}) — $K(f) = S_{21}(f)$.

При необходимости следует скорректировать параметры СУ таким образом, чтобы добиться согласования по критерию $K_{STU} \leq K_{STU \text{ доп}}$ в как можно большей полосе частот.

Результаты расчётов и моделирования СУ необходимо занести в сводную таблицу, рекомендуемое оформление которой представлено в таблице 1.9 (см. п. 1.5).

1.4 Выполнение лабораторной работы

1.4.1 Подготовка проекта в AWR Microwave Office

1.4.1.1 Тщательно изучите теоретические сведения, представленные в методических указаниях.

1.4.1.2 Выполните запуск MWO. На панели инструментов выберите **Options** — **Project Options**, после чего в открывшемся окне выберите **Global Units** и нажмите **Edit Units**. В появившемся окне настройте стандартные единицы измерения проекта и нажмите **OK**, как показано на рисунке 1.34.

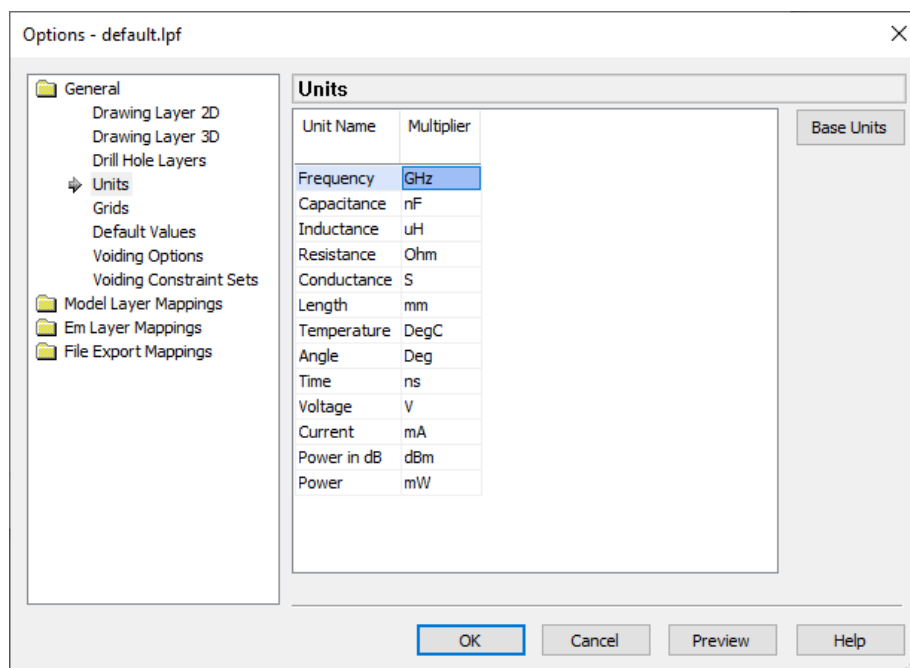


Рисунок 1.34 — Вид окна настройки единиц измерения

1.4.1.3 Не закрывая окно **Project Options**, перейдите во вкладку **Frequencies**, после чего откроется окно настройки диапазона частот моделирования проекта. Выполните следующее:

- в поле **Start (GHz)** укажите частоту, равную $0,5 \cdot f_0$, где f_0 — расчётное значение центральной частоты по индивидуальному заданию (таблица 1.1);

- в поле **Stop (GHz)** укажите частоту, равную $1,5 \cdot f_0$;
- в поле **Step (GHz)** укажите шаг, равный 0,01 ГГц;
- нажмите **Apply**, а после этого **OK**.

1.4.1.4 Перейдите в **File — Save Project As** для сохранения файла проекта. Укажите директорию, в которую будет сохранён файл, а также название файла проекта.

Примечания.

1) В случае, если лабораторная работа выполняется на ПК в университете, избегайте сохранения файлов на рабочем столе или в «случайных местах». Вместо этого в папке для студенческих работ, например, «*Student Files*», которая, как правило, располагается на рабочем столе, следует создать папку, в названии которой подробно отразить группу студента, ФИО и дисциплину, например, «**АС ЛР1 Миронов ИИ РСс-23**».

2) Для наименования файла проекта не используйте кириллицу. Рекомендуется давать осмысленное название проекта, которое позволит однозначно понять содержимое проекта, например, «**AS_Lab1_Mironov_RS23**».

1.4.1.5 Перейдите в **Global Definitions** в окне управления проектом (рисунок 1.35), после чего справа в окне проектирования откроется поле глобальных определений.

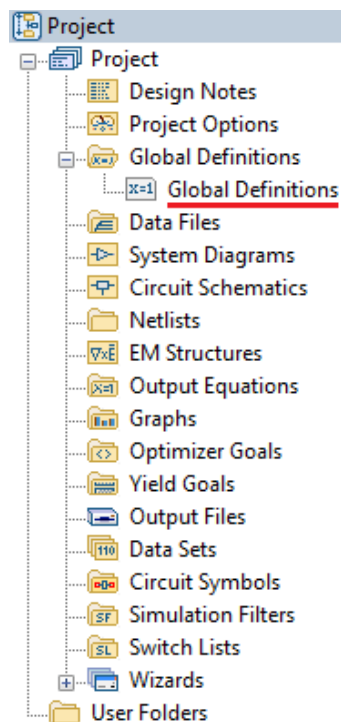


Рисунок 1.35 — Пояснение к переходу в *Global Definitions*

1.4.1.6 На панели инструментов нажмите на кнопку « ELE »», которая вызывает меню для поиска схмотехнических элементов. Поиск в нём можно осуществлять либо по пересечению слов с названием компонента (*Name*), либо с его описанием (*Description*). Наберите в поле «*MSUB*», и выберите в

результатах поиска компонент **MSUB** (*Microstrip SUBstrate*), соответствующий компоненту для задания диэлектрической подложки для МЛП (рисунк 1.36), после чего поместите компонент **MSUB**, как показано на рисунке 1.37.

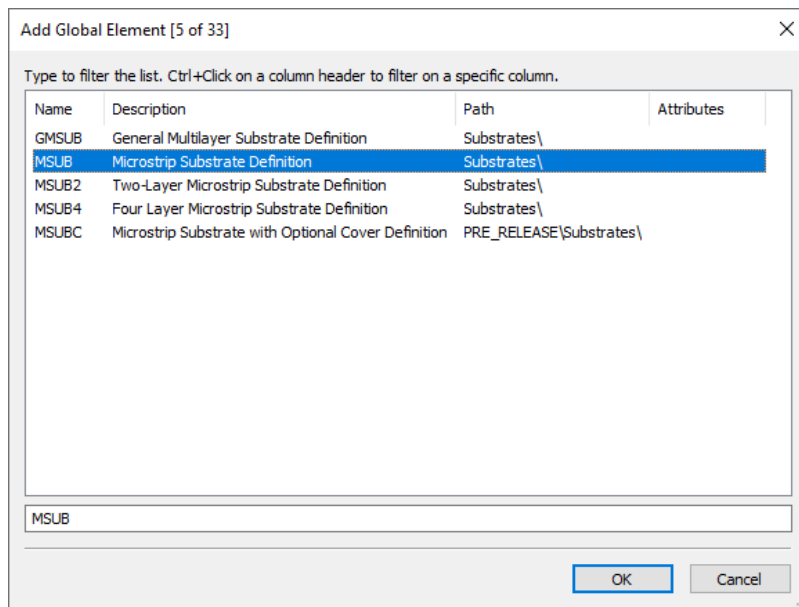


Рисунок 1.36 — Пояснение к поиску компонента **MSUB**

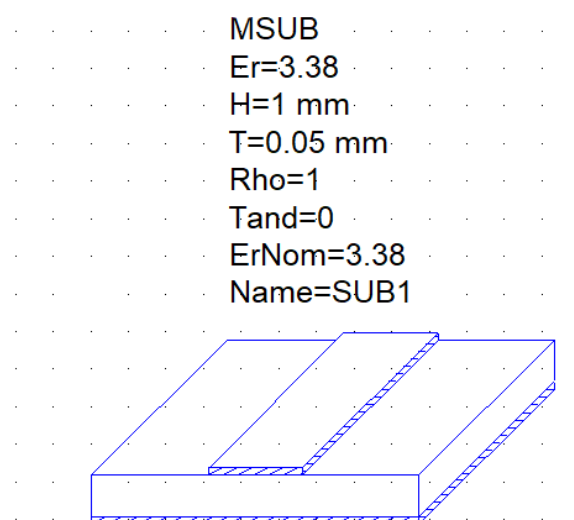


Рисунок 1.37 — Вид компонента для определения параметров диэлектрической подложки для МЛП

1.4.1.7 Укажите параметры подложки в соответствии с индивидуальным заданием (таблица 1.3), при этом толщину проводника оставьте равной **$T = 0,05$ мм**, а нормированное к золоту удельное сопротивление проводника оставьте равным **$R_{ho} = 1$** .

Обратите внимание, что данному компоненту присвоено имя «**Name=SUB1**», что позволяет привязывать компоненты МЛП в проекте к подложке с конкретно заданным именем.

1.4.1.8 Используя кнопку для задания уравнений и переменных «», задайте в том же поле следующие переменные (рисунок 1.38):

- **j** — переменная для задания мнимой единицы;
- **Rn** — переменная для задания активного сопротивления нагрузки, которое рассчитывается по варианту;
- **Xn** — переменная для задания реактивного сопротивления нагрузки, которое рассчитывается по варианту;
- **Zn1** — переменная для задания комплексного сопротивления нагрузки $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$;
- **Zn2** — переменная для задания комплексного сопротивления нагрузки $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} - jX_{\text{вх ант}}$.

1.4.1.9 Используя выражение (1.19), выразите и рассчитайте значение длины волны в МЛП λ на центральной частоте f_0 . Занесите его в сводную таблицу результатов выполнения лабораторной работы.

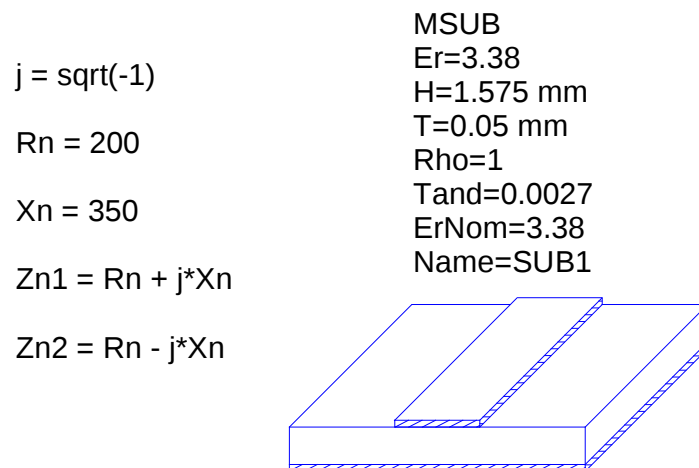


Рисунок 1.38 — Вид настроенного окна определения глобальных компонентов

1.4.2 Расчёт и моделирование четвертьволнового трансформатора

1.4.2.1 Используя выражения (1.16), рассчитайте требуемые физические параметры **ЧВТ** — длину отрезка ЧВТ $l_{\text{ЧВТ}}$ и его волновое сопротивление $\rho_{\text{ЧВТ}}$. Занесите результаты расчёта в сводную таблицу результатов исследования ЧВТ, как показано на примере таблицы 1.4.

Таблица 1.4 — Результаты исследования четвертьволнового трансформатора

№	Случай входного сопротивления антенны (сопротивление нагрузки)			
	Параметр/характеристика СУ	Ед. изм.	Расчёт	Модель
1.1.	Чисто активная нагрузка $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + j0$			
	Длина отрезка $l_{\text{ЧВТ}}$	мм	...	...
	Волновое сопротивление $\rho_{\text{ЧВТ}}$	Ом	...	—
	Ширина отрезка $W_{\text{ЧВТ}}$	мм	...	...
	Относительная полоса согласования ξ	%	...	...
1.2.	Чисто активная нагрузка $Z_{\text{вх ант}} = 2 \cdot R_{\text{вх ант}} + j0$			
	Длина отрезка $l_{\text{ЧВТ}}$	мм	...	...
	Волновое сопротивление $\rho_{\text{ЧВТ}}$	Ом	...	—
	Ширина отрезка $W_{\text{ЧВТ}}$	мм	...	...
	Относительная полоса согласования ξ	%	...	...
1.3.	Комплексная нагрузка $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$			
	Длина отрезка $l_{\text{ЧВТ}}$	мм	...	...
	Волновое сопротивление $\rho_{\text{ЧВТ}}$	Ом	...	—
	Ширина отрезка $W_{\text{ЧВТ}}$	мм	...	...
	Расстояние от нагрузки до точки подключения $l_{\text{вкл ЧВТ}}$	мм	...	...
	Относительная полоса согласования ξ	%	—	...

1.4.2.2 Запустите в *MWO* калькулятор *TXLine*, выбрав в верхней панели *Tools — TXLine....* Рассчитайте требуемую ширину отрезку $W_{\text{ЧВТ}}$, которая соответствует полученному ранее значению волнового сопротивления $\rho_{\text{ЧВТ}}$.

Руководствуясь сведениями о работе с *TXLine*, представленными в п. 1.2.9, в качестве материала диэлектрика укажите «*RT/Duroid 5880*», а в качестве материала проводника укажите медь («*Copper*»), проводимость которого не изменяйте. Толщину проводника укажите соответствующей в п.п. 1.4.1.3, а толщину диэлектрика, диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь укажите в соответствии с вариантом индивидуального задания.

Задайте в качестве частоты значение f_0 , в качестве электрической длины — 90° , что соответствует четверти длины волны $\lambda/4$, а в качестве импеданса — волновое сопротивление $\rho_{\text{ЧВТ}}$, после чего нажмите на кнопку «». В результате в правой части окна появятся расчётные значения требуемых длины и ширины ЧВТ (рисунок 1.39).

1. Задать параметры диэлектрической подложки и проводника

2. Задать требуемые значения частоты и импеданса

3. Нажать и выписать расчетные параметры длины и ширины отрезка

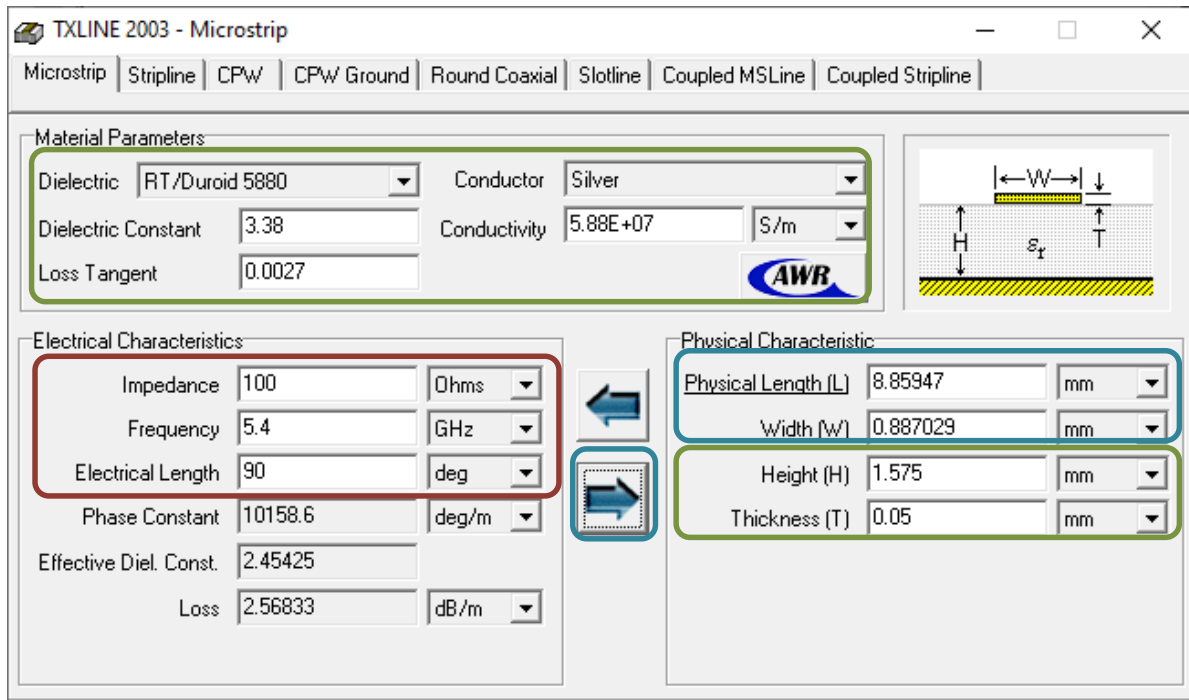


Рисунок 1.39 — Пояснение к порядку расчёта в программе *TXLine*

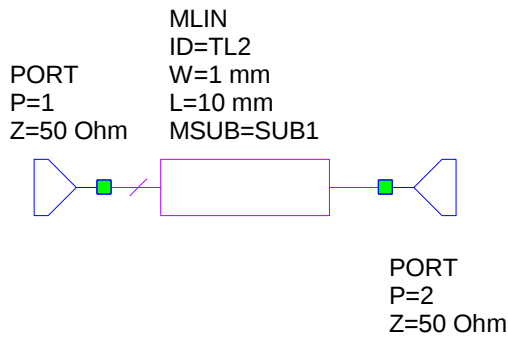
Сравните значение длины $l_{\text{ЧВТ}}$, рассчитанное в *TXLine*, с полученным ранее, и занесите его вместе со значением ширины $W_{\text{ЧВТ}}$ в сводную таблицу.

1.4.2.3 Для создания схемы в поле управления проектом нажмите правой кнопкой мыши (ПКМ) на **Circuit Schematics** и выберите опцию **New Schematic....** В появившемся окне задайте схеме осмысленное название, например, «**1 Quarter Wave Transformer**».

Примечание. Не рекомендуется использовать кириллицу в названиях схем, графиков и пр. в *MWO*, поскольку их отображение, как правило, оказывается некорректным.

1.4.2.4 Используя меню для поиска элементов схем, вызываемое кнопкой « ELE», а также кнопку добавления порта « PORT», соберите схему, как показано на рисунке 1.40.

a)



б)

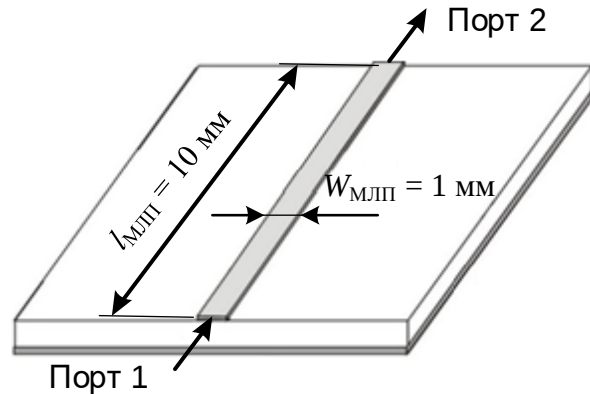


Рисунок 1.40 — Схема отрезка МЛП с двумя портами (а) и его трехмерная топология (б)

Данная схема содержит элемент **MLIN** (*Microstrip LINE*), соответствующий отрезку МЛП, а также два порта с сопротивлением 50 Ом. Для того, чтобы выполнить поворот второго порта, нажмите на него ПКМ и выберите *Rotate* или *Flip*.

Обратите внимание, что все добавляемые элементы ссылаются к компоненту **MSUB=SUB1**, что соответствует общей автоматически выбираемой диэлектрической подложке для элементов.

1.4.2.5 Используя кнопку для задания уравнений и переменных «», задайте в схеме следующие переменные:

- **WT** — ширина отрезка ЧВТ, равная расчётной ширине ЧВТ $W_{\text{ЧВТ}}$;
- **LT** — длина отрезка ЧВТ, равная расчётной длине ЧВТ $l_{\text{ЧВТ}}$.

Установите значения ширины и длины отрезка МЛП через заданные переменные **WT** и **LT** соответственно, а сопротивление второго порта равным переменной **Rn** (случай чисто активной нагрузки), после чего окно схемы должно принять вид, как показано на рисунке 1.41.

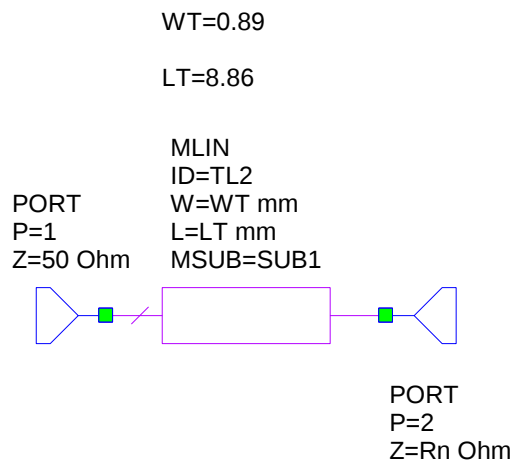


Рисунок 1.41 — Схема с ЧВТ

Отрезок МЛП с такими параметрами выполняет роль ЧВТ, преобразующего сопротивление первого порта (50 Ом) в сопротивление второго порта (соответствующее R_n).

Сохраните полученную схему в отчёт. Для качественного копирования схем, графиков и пр. в векторном формате рекомендуется сохранение выполнять нажатием в верхней панели на **Edit — All to Clipboard**, после чего содержимое сохраняется в буфер обмена и может быть вставлено непосредственно в отчёт.

1.4.2.6 Создайте график измеряемых величин модуля ККО для оценки согласованности.

Для этого в поле управления проектом нажмите ПКМ по **Graphs** и выберите **New Graph...** В качестве типа графика укажите **Rectangular** (прямоугольная система координат), и задайте осмысленное название — например, «**1 Reflection Coefficient**», как показано на рисунке 1.42.

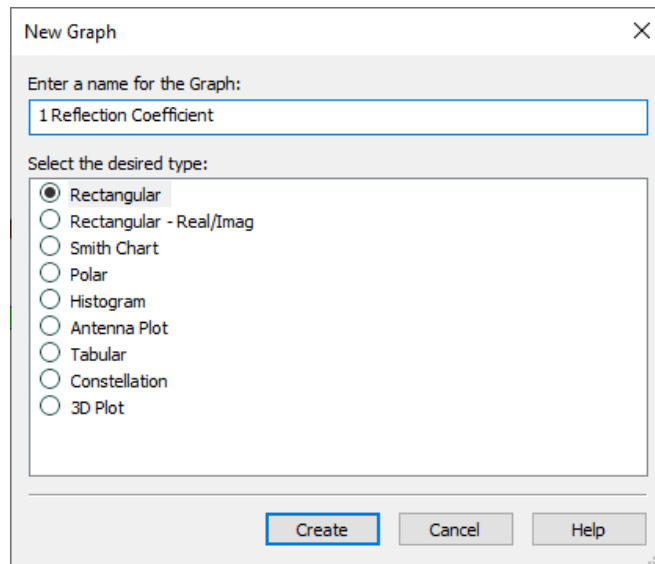


Рисунок 1.42 — Окно создания графика

После этого нажмите ПКМ по названию графика в поле управления проектом, и выберите опцию **Add Measurement...** для добавления измеряемых величин, как показано на рисунке 1.43.

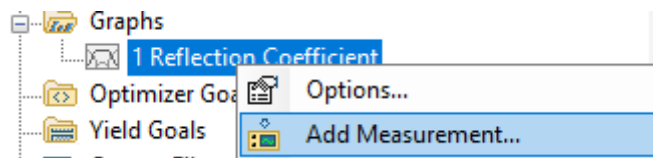


Рисунок 1.43 — Пояснение к добавлению измеряемой величины

Окно настройки измеряемых величин настройте следующим образом (рисунок 1.44):

— в поле **Measurement Type** выберите и раскройте тип **Linear**, далее укажите тип **Port Parameters**, после чего в поле **Measurement** выберите измеряемую величину **S**, которая соответствует параметрам матрицы рассеяния (**S**-параметрам), одним из которых является ККО (S_{11});

— в поле **Data Source Name**, которое выбирает схему для проведения измерения, в открывающемся списке укажите **свою текущую схему**;

— в поле **To Port Index** укажите **индекс 1** (в каком порту измеряется выходной сигнал);

— в поле **From Port Index** укажите **индекс 1** (из какого порта подаётся входной сигнал);

— в поле **Sweep Freq**, которое настраивает частоты для измерений, укажите **Use for x-axis**, что соответствует откладыванию значений частоты f по оси абсцисс, за счёт чего строится зависимость величины в указанном диапазоне частот;

— в поле **Complex Modifier** укажите **Mag.**, что соответствует построению модуля измеряемой величины, в случае, если она является комплексной.

После всех настроек нажмите ОК.

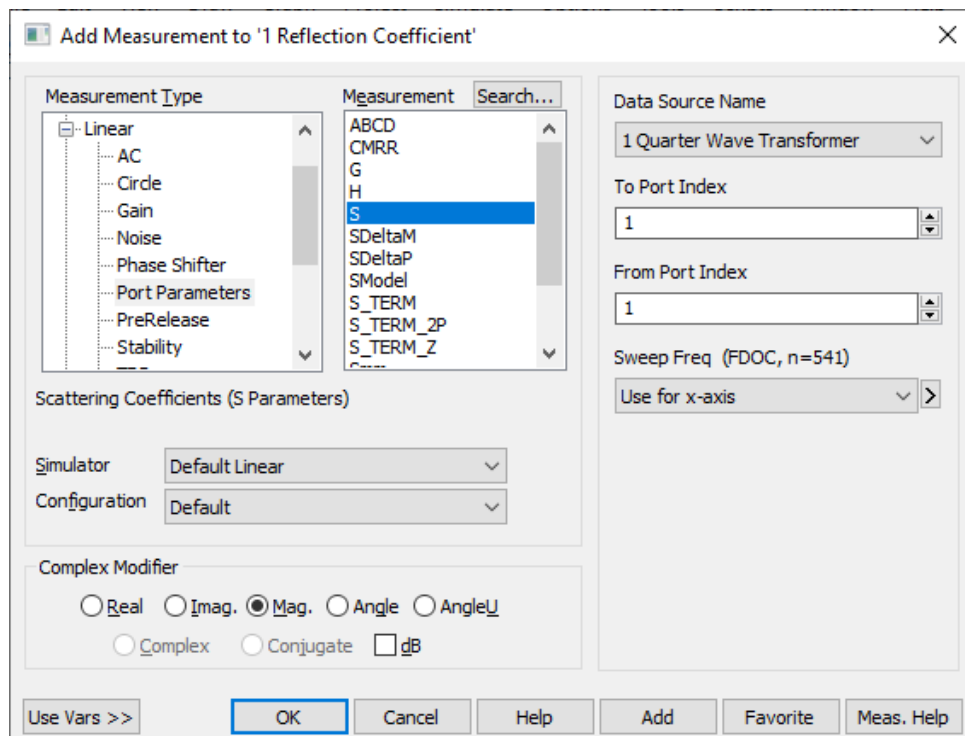


Рисунок 1.44 — Пояснение к измерению модуля ККО

1.4.2.7 Нажмите на кнопку «» либо на горячую клавишу «F8» для запуска моделирования. Появится окно отображения прогресса моделирования, которое можно скрыть по умолчанию, если убрать галочку с опции «Keep this window open when finished», а также отобразится сам график измеряемой величины.

Проанализируйте вид полученного графика, сделайте выводы о величине модуля ККО на центральной частоте f_0 и на граничных частотах диапазона моделирования.

Нажмите ПКМ по полю графика и выберите опцию **Add Marker**, после чего установите появившийся маркер на центральной частоте f_0 . Сохраните в таком виде график в отчёт по лабораторной работе.

1.4.2.8 Создайте график коэффициента передачи со входа на выход. Для этого, действуя в соответствии с п.п. 1.4.2.6., создайте новый график в прямоугольной системе координат с осмысленным названием — например, «**1 Transmission Coefficient**». Укажите полностью аналогичные настройки измеряемых величин, кроме поля **To Port Index**, в котором выберите **индекс 2** (выбор выходного порта), что соответствует измерению модуля комплексного коэффициента передачи (ККП) цепи S_{21} .

Проанализируйте вид полученного графика, сделайте выводы о величине модуля ККП и возникающих потерях мощности сигнала на центральной частоте f_0 и на граничных частотах диапазона моделирования, а также сохраните график.

1.4.2.9 Создайте график измеряемых величин КСВ. Для этого, действуя в соответствии с п.п. 1.4.2.6, создайте новый график в прямоугольной системе координат с осмысленным названием — например, «**1 VSWR**» (аббревиатура КСВ на английском). Добавьте измеряемую величину КСВ, для чего в поле **Measurement** нажмите **Search...** и в появившемся окне поиска измеряемых величин наберите и укажите **VSWR**. Измерьте КСВ для входного порта (**Port Index** — **1**) в зависимости от частоты (**Sweep Freq** — **Use for x-axis**), после чего нажмите ОК.

Запустите моделирование и проанализируйте полученный график.

Установите маркеры на графике в трёх местах (рисунок 1.45):

- на центральной частоте f_0 ;
- на меньшей частоте f_{01} , при которой значение КСВ достигает рассчитанного по варианту уровня $K_{СТУ}(f_{01}) = K_{СТУ \text{ доп}}$;
- на большей частоте f_{02} , при которой $K_{СТУ}(f_{02}) = K_{СТУ \text{ доп}}$.

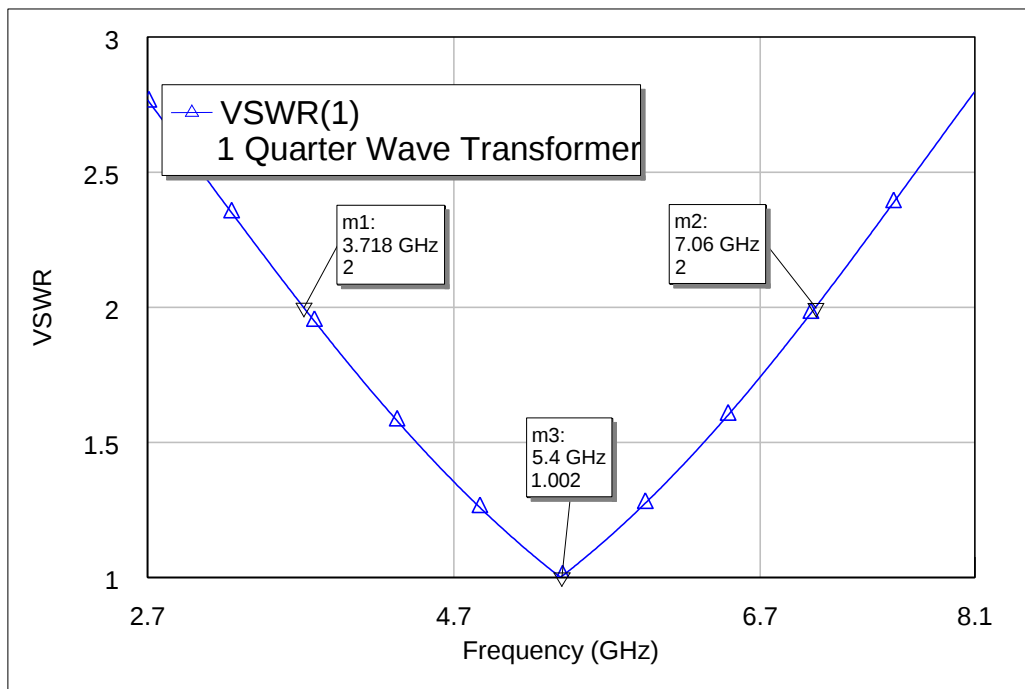


Рисунок 1.45 — Пример измеренного графика КСВ с указанием диапазона частот согласования по критерию $K_{CTU} \leq 2$

1.4.2.10 Используя выражение (1.21), рассчитайте и занесите в сводную таблицу исследований ЧВТ теоретическое значение **относительной полосы согласования ЧВТ ξ** . Определите относительную полосу согласования в модели, опираясь на полученные в п.п. 1.4.2.9 значения частот в соответствии с формулой:

$$\xi = \frac{f_{02} - f_{01}}{f_0} \cdot 100\%. \quad (1.36)$$

Занесите полученное значение в таблицу и сравните с расчётным теоретическим.

1.4.2.11 Задайте сопротивление второго порта в схеме равным $2 \cdot R_n$, что соответствует следующему случаю исследования свойств ЧВТ.

Используя аналогичные подходы, рассчитайте требуемые параметры ЧВТ и занесите их в сводную таблицу. Осуществите моделирование и сохраните полученный график КСВ, а также сравните значения относительной полосы согласования ξ , полученные в результате расчётов и моделирования.

Сделайте выводы о характере изменения относительной полосы согласования при увеличении перепада согласуемых импедансов.

1.4.2.12 Задайте сопротивление второго порта в схеме равным $Z_{\text{вх ант}}$, что соответствует включению ЧВТ для согласования комплексной нагрузки Z_{n1} .

Используя выражения (1.31), (1.32), (1.34), рассчитайте и занесите в таблицу требуемые геометрические параметры ЧВТ и места его включения.

1.4.2.13 Используя *TXLine*, рассчитайте значение ширины W_0 , которое соответствует волновому сопротивлению отрезка МЛП $\rho = 50$ Ом.

Дополните схему в *MWO* отрезком МЛП между ЧВТ и выходным портом, который соответствует подключению ЧВТ в сечении на некотором расстоянии от нагрузки, как показано на рисунке 1.46.

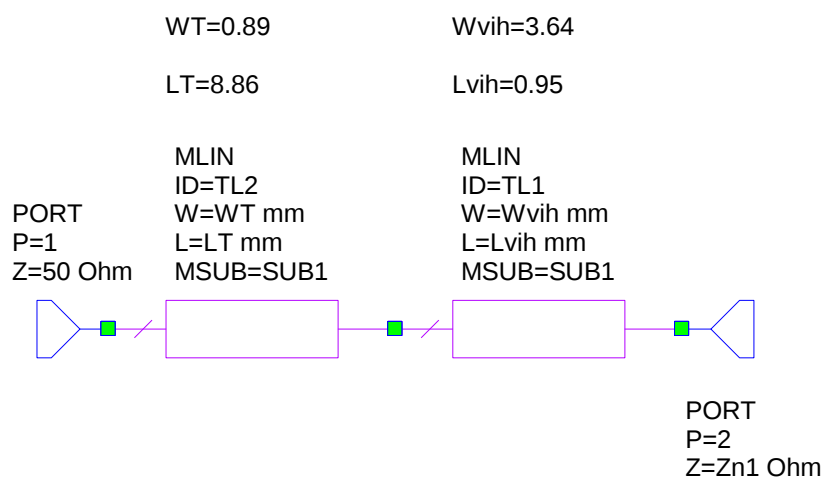


Рисунок 1.46 — Схема с подключением ЧВТ для согласования комплексной нагрузки

Ширину второго отрезка укажите через переменную W_{vih} , равную ширине 50-омной МЛП W_0 , а длину укажите через переменную L_{vih} , равную расстоянию подключения ЧВТ от нагрузки $l_{\text{вкл ЧВТ}}$.

1.4.2.14 Обратите внимание, что зачастую из-за использования упрощённых математических моделей рассчитанные значения физических параметров МЛП могут сильно отличаться от тех, которые в действительности обеспечили бы наилучшее согласование. В связи с этим, необходимо осуществлять постоянную параметрическую подстройку параметров.

Для этого используйте инструмент **Tune Tool**, который вызывается нажатием на кнопку «» на верхней панели. После вызова инструмента поочерёдно нажмите на все используемые переменные, после чего они станут подсвечены синим цветом.

Перейдите в окно графика КСВ, выполните его моделирование и в случае неудовлетворительного согласования вызовите панель **Tune** нажатием на кнопку «» на верхней панели. В результате появится окно, содержащее тюнеры для подстройки переменных, как показано на рисунке 1.47.

Tuner (Showing 4 of 4)

Save Restore Freeze Clear ?

Document	Element	ID	Parameter	Tune	Step Size	Lower	Tuner	Upper	Value	Tag
1 Quarter Wave Transformer	EQN	LT		☒	0.1	4.43		17.72	8.86	
1 Quarter Wave Transformer	EQN	WT		☒	0.01	0.28		1.78	0.89	
1 Quarter Wave Transformer	EQN	Wvih		☒	0.05	1.82		7.28	3.64	
1 Quarter Wave Transformer	EQN	Lvih		☒	0.01	0.475		1.9	0.95	

Рисунок 1.47 — Схема с подключением ЧВТ на расстоянии от нагрузки

Данное меню позволяет в наглядной визуальной форме с помощью регулируемых ползунков подстраивать значения переменных модели, отслеживая изменения графиков измеряемых величин в реальном масштабе времени. В поле **Parameter** указывается имя регулируемой переменной, в полях **Lower** и **Upper** — пределы ползунков, которые могут быть скорректированы, а в поле **Step Size** — шаг перестройки ползунка.

Используя тюнер переменных, проанализируйте, как изменения значений различных переменных влияет на согласованность. Передвигая ползунки, добейтесь как можно лучшего согласования на центральной частоте f_0 , обеспечивая по возможности согласования в как можно большей полосе частот.

Занесите в таблицу полученные геометрические параметры, соответствующие наилучшему на Ваш взгляд подобранному случаю согласования, а также определите по графику относительную полосу согласования ξ .

После окончания процедуры подстройки переменных не забудьте отключить возможность их регулирования, выбрав инструмент *Tune Tool* и нажав на каждую из редактируемых переменных, после чего выделение переменных синим цветом исчезнет.

1.4.2.15 Дополните схему входным 50-омным отрезком МЛП произвольной длины, например, $l = 5$ мм (рисунок 1.48). Ширину укажите соответствующую сопротивлению 50 Ом. Поскольку его сопротивление совпадает с импедансом входного порта, этот отрезок не оказывает никакого влияния на согласование с нагрузкой. Фактически, эта схема демонстрирует место включения СУ — разрыв линии передачи (фидера).

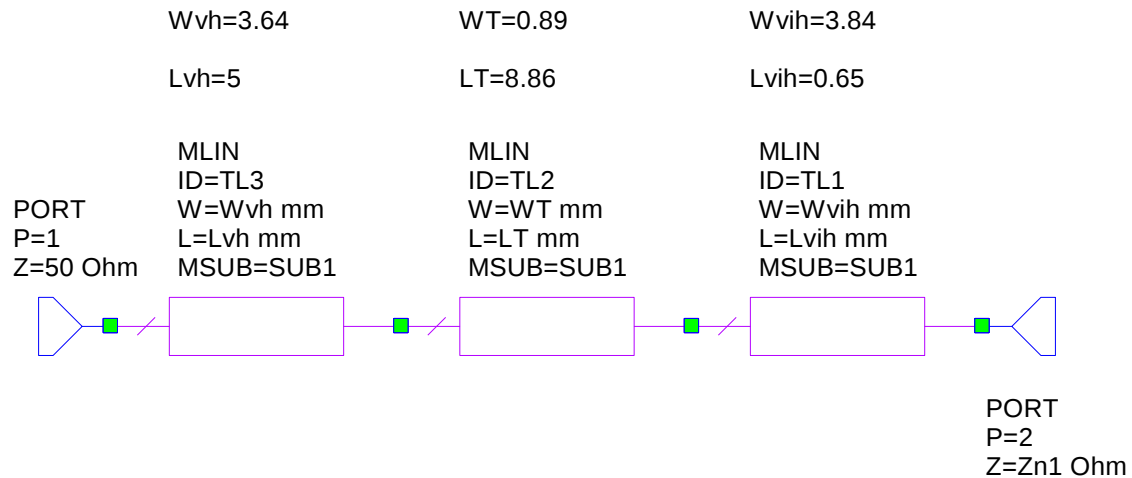


Рисунок 1.48 — Схема с ЧВТ и входным 50-омным отрезком МЛП

1.4.2.16 Нажмите на кнопку «» в верхней панели для того, чтобы перейти от вида схемы СУ к виду её **топологии** — отображения физического воплощения схемных элементов отрезков МЛП на диэлектрической подложке. Выделите все элементы, нажав **Ctrl + A**, и объедините вместе все компоненты, нажав на верхней панели на кнопку **Snap Together** «». В результате появится итоговый вид сверху топологии СУ на поверхности диэлектрической подложки, пример которого показан на рисунке 1.49. В левой части топологии подключается входной порт, в правой — выходной порт. В данной топологии тонкому отрезку МЛП соответствует ЧВТ.



Рисунок 1.49 — Вид топологии МПЛ, согласованной с нагрузкой с применением ЧВТ

Сохраните полученную топологию ЧВТ в отчёт. При желании можно ознакомиться также с трёхмерным видом топологии над прозрачной диэлектрической подложкой, нажав на кнопку «».

1.4.2.17 Для удобства навигации в проекте можете воспользоваться инструментом **User Folders**.

Для этого в поле управления проектом нажмите ПКМ на *User Folders* и выберите *Add New — Folder*. Дайте папке осмысленное название, например, «1 Quarter Wave Transformer».

После этого в папку можно зажатием левой кнопки мыши (ЛКМ), либо через нажатие ПКМ и выбор опции *Add Existing Item* перетаскивать отдельные элементы (схемы, графики) для их совместного группирования, что становится удобным для больших проектов. Пример организации проекта представлен на рисунке 1.50.

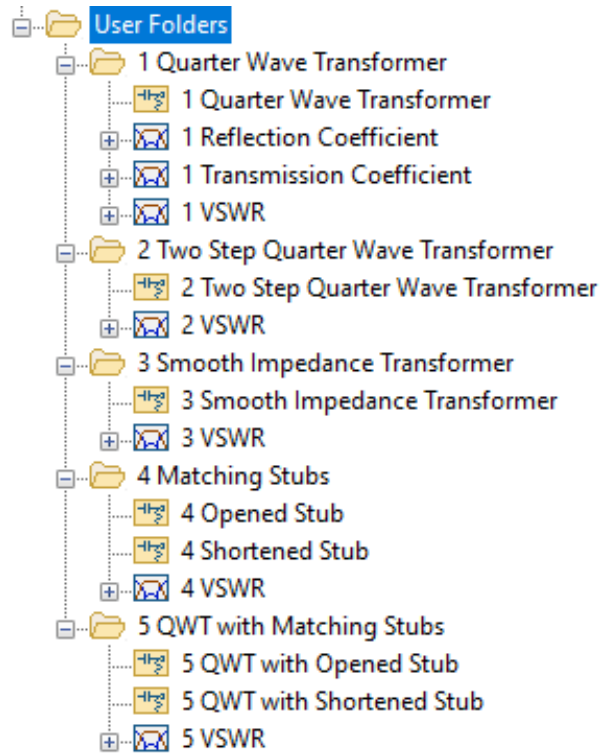


Рисунок 1.50 — Пример организации проекта с помощью *User Folders*

1.4.3 Расчёт и моделирование двухступенчатого четвертьволнового трансформатора

1.4.3.1 Используя выражение (1.22) и калькулятор *TXLine*, рассчитайте требуемые физические параметры **двухступенчатого ЧВТ** при подключении к чисто активной нагрузке $R_{\text{вх ант}}$ и занесите их в сводную таблицу результатов исследования двухступенчатого ЧВТ, пример оформления которой представлен в таблице 1.5.

Таблица 1.5 — Результаты исследования двухступенчатого четвертьволнового трансформатора

№	Случай входного сопротивления антенны (сопротивление нагрузки)			
	Параметр/характеристика СУ	Ед. изм.	Расчёт	Модель
2.1.	Чисто активная нагрузка $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + j0$			
	Длина отрезка $l_{\text{ЧВТ1}}$	мм	...	...
	Длина отрезка $l_{\text{ЧВТ2}}$	мм	...	...
	Волновое сопротивление $\rho_{\text{ЧВТ1}}$	Ом	...	—
	Волновое сопротивление $\rho_{\text{ЧВТ2}}$	Ом	...	—

	Ширина отрезка $W_{\text{ЧВТ1}}$	мм	...	...
	Ширина отрезка $W_{\text{ЧВТ2}}$	мм	...	...
	Относительная полоса согласования ξ	%	...	...
2.2.	Комплексная нагрузка $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$			
	Длина отрезка $l_{\text{ЧВТ1}}$	мм	...	...
	Длина отрезка $l_{\text{ЧВТ2}}$	мм	...	...
	Волновое сопротивление $\rho_{\text{ЧВТ1}}$	Ом	...	—
	Волновое сопротивление $\rho_{\text{ЧВТ2}}$	Ом	...	—
	Ширина отрезка $W_{\text{ЧВТ1}}$	мм	...	...
	Ширина отрезка $W_{\text{ЧВТ2}}$	мм	...	...
	Расстояние от нагрузки до точки подключения $l_{\text{вкл ЧВТ}}$	мм	—	...
	Относительная полоса согласования ξ	%	—	...

1.4.3.2 Создайте в *MWO* новую схему, которую назовите как, например, «*2 Two Step Quarter Wave Transformer*», и соберите её аналогично тому, как показано на рисунке 1.51.

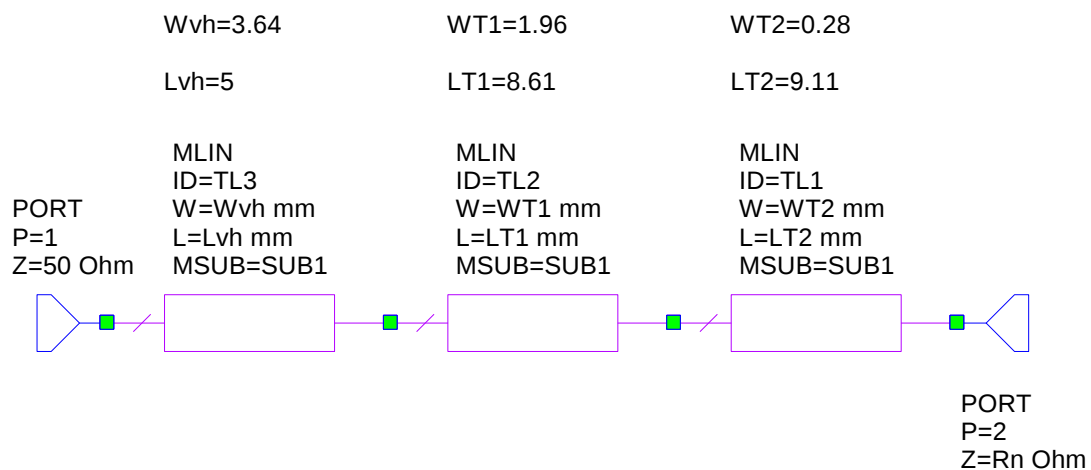


Рисунок 1.51 — Схема с двухступенчатым ЧВТ и входным 50-омным отрезком МЛП

В этой схеме используются следующие переменные:

— W_{vh} , L_{vh} — ширина и длина соответственно входного 50-омного отрезка МЛП;

— $WT1$, $LT1$ — ширина и длина соответственно первой ступени ЧВТ, которые соответствуют расчётным значениям $W_{\text{ЧВТ1}}$ и $l_{\text{ЧВТ1}}$;

— $WT2$, $LT2$ — ширина и длина соответственно второй ступени ЧВТ, которые соответствуют расчётным значениям $W_{\text{ЧВТ2}}$ и $l_{\text{ЧВТ2}}$.

Сохраните схему в отчёт.

1.4.3.3 Осуществите моделирование и сохраните полученный график КСВ с маркерами, а также сравните значения относительной полосы согласования ξ , полученные в результате расчётов и моделирования.

Сделайте выводы о характере изменения относительной полосы согласования при увеличении количества согласующих ступеней.

Примечание. В случае, если относительная полоса согласования не укладывается в диапазон частот моделирования $0,5f_0 \dots 1,5f_0$, следует его расширить, нажав ПКМ на название схемы, выбрав *Options...*, убрав галочку с пункта *Use project defaults* и настроив индивидуальный диапазон частот для этой схемы.

1.4.3.4 Задайте сопротивление порта равным комплексному сопротивлению $Z_{\text{вх ант}}$. При этом дополните схему выходным отрезком МЛП, который регулирует расстояние точки подключения двухступенчатого ЧВТ от нагрузки, как показано на рисунке 1.52.

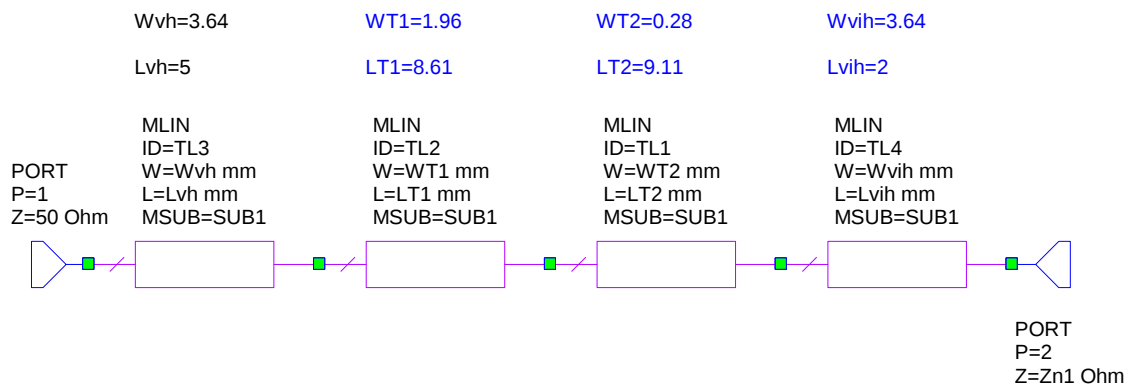


Рисунок 1.52 — Схема с двухступенчатым ЧВТ и входным 50-омным отрезком МЛП

При этом первичные значения ширины выходного отрезка МЛП укажите равной W_0 (соответствующей 50 Ом), а длину укажите произвольной — например, 1 мм. Используя *Tune Tool*, осуществите подстройку переменных таким образом, чтобы добиться наилучшего согласования на центральной частоте f_0 и как можно более широкополосного согласования.

Измерьте полученную относительную полосу согласования ξ и запишите это значение вместе с итоговыми физическими параметрами СУ в сводную таблицу результатов исследования двухступенчатого ЧВТ. Сохраните полученную схему, её топологию, а также график КСВ в отчёт.

1.4.4 Расчёт и моделирование трансформатора с плавным переходом

1.4.4.1 Создайте схему с трансформатором на основе плавного перехода, длина которого **параметрически изменяется** в диапазоне значений $L_T = \{0,5 \cdot \lambda; 1,0 \cdot \lambda; 1,5 \cdot \lambda; 2,0 \cdot \lambda\}$, как показано на рисунке 1.53. Параметрическое изменение длины реализуется за счёт использования элемента **SWPVAR**, который задаёт диапазон значений множителя k_L . Сопротивление выходного порта укажите чисто активным и равным $0,5 \cdot R_{\text{вх ант}}$.

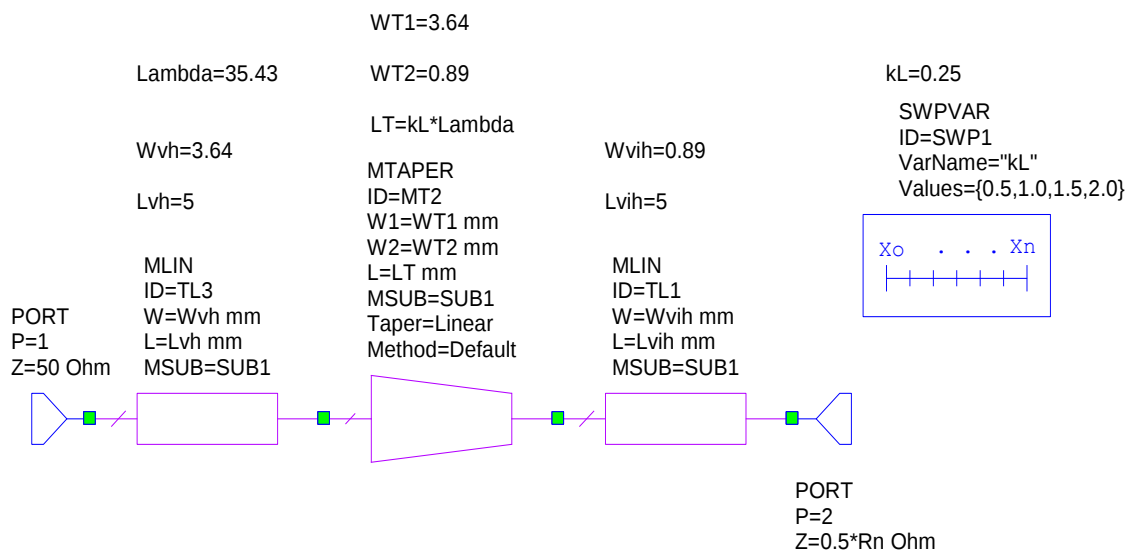


Рисунок 1.53 — Схема с двухступенчатым ЧВТ и входным 50-омным отрезком МЛП

Отрезку МЛП с плавным переходом соответствует элемент **MTAPER**, для которого, помимо длины L_T и граничных значений ширины отрезка W_1 и W_2 , задаётся профиль изменения ширины *Taper*, который может равномерным (**Linear**) либо экспоненциальным (**Exponential**).

В этой схеме используются следующие переменные:

— W_{vh} , L_{vh} — ширина и длина соответственно входного 50-омного отрезка МЛП (длина выбирается с произвольным небольшим значением);

— WT_1 — ширина отрезка МЛП, соответствующая сопротивлению 50 Ом;

— WT_2 — ширина отрезка МЛП, соответствующая сопротивлению $0,5 \cdot R_{\text{вх ант}}$ (рассчитывается через $TXLine$);

— W_{vih} , L_{vih} — ширина и длина соответственно выходного отрезка МЛП с сопротивлением $0,5 \cdot R_{\text{вх ант}}$ (длина выбирается с произвольным небольшим значением);

— Λ — полная длина волны, которая рассчитывается через $TXLine$ на частоте f_0 , сопротивлении 50 Ом и при электрической длине 360° .
Сохраните схему и топологию СУ в отчёт.

1.4.4.2 Задайте профиль изменения ширины плавного перехода в соответствии с вариантом индивидуального задания и измерьте КСВ на входе, выбрав в поле **SWPVAR.SWP1** пункт **Plot all traces** (рисунок 1.54), что соответствует построению семейства графиков КСВ при всех возможных случаях параметрически изменяемой переменной k_L .

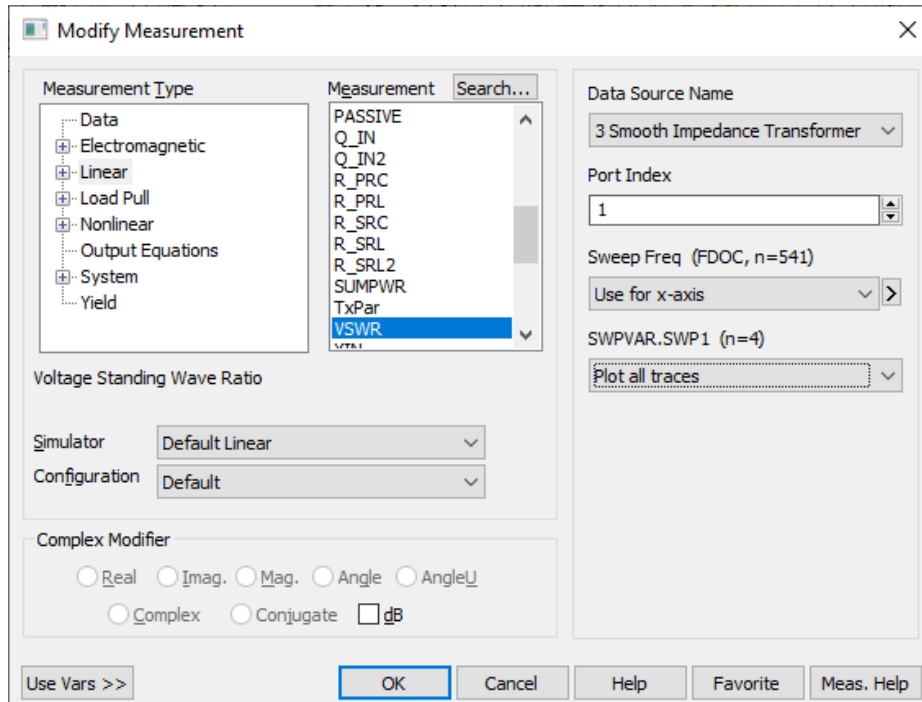


Рисунок 1.54 — Пояснение к построению семейства графиков с параметрическим изменением переменной

Сохраните полученный график КСВ с маркерами, установленными на центральной частоте f_0 , как показано на рисунке 1.55.

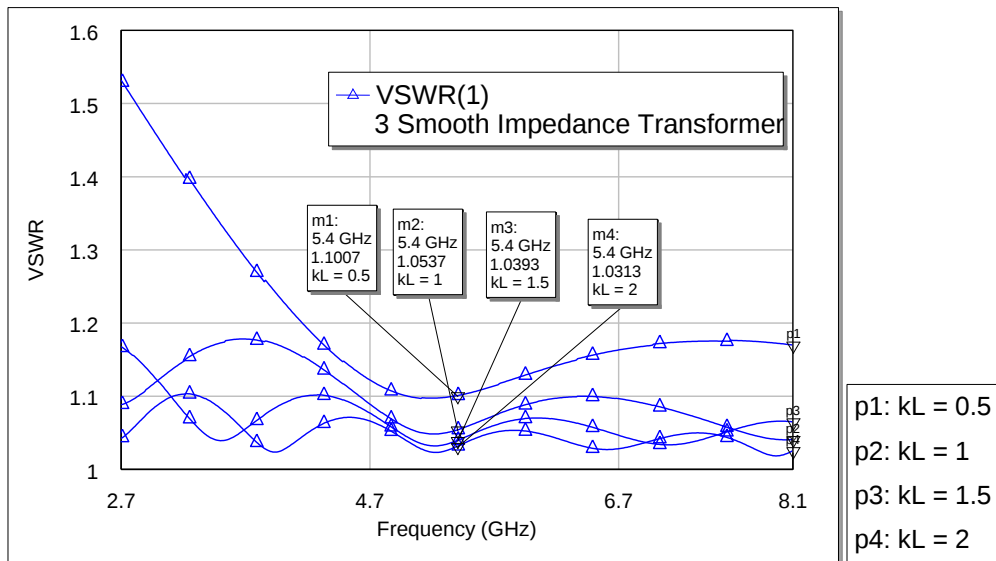


Рисунок 1.55 — Пример семейства КСВ при разных значениях k_L

1.4.4.3 Для каждого случая k_L измерьте **минимальное и максимальное значения КСВ** в диапазоне частот моделирования ($K_{CTU \min}$ и $K_{CTU \max}$) и занесите их в сводную таблицу результатов исследования плавного перехода, пример оформления которой показан в таблице 1.6. Для этого можно использовать маркер с автопоиском, который задаётся через опцию **Add Auto-Search Marker**, после чего выбирается требуемый тип маркера (**Max**, **Min**, **Peak**, ...) и устанавливается на нужный график. Пример их использования продемонстрирован на рисунке 1.56.

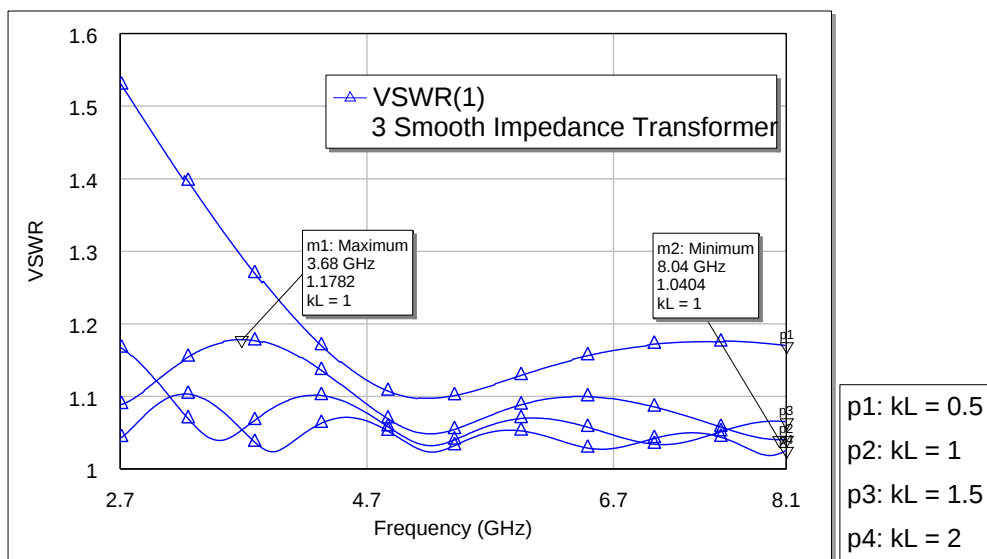


Рисунок 1.56 — Пример использования маркеров с автопоиском для нахождения $K_{CTU \min}$ и $K_{CTU \max}$

Таблица 1.6 — Результаты исследования трансформатора на основе плавного перехода

№	Случай входного сопротивления антенны (сопротивление нагрузки)			
	Профиль изменения ширины	Длина перехода	$K_{STU \min}$	$K_{STU \max}$
3.1.	Чисто активная нагрузка $Z_{вх ант} = 0,5 \cdot R_{вх ант} + j0$			
	Равномерный профиль (для чётных вариантов n)	$0,5 \cdot \lambda$	...	...
		$1,0 \cdot \lambda$	...	...
		$1,5 \cdot \lambda$	...	...
		$2,0 \cdot \lambda$	...	...
3.2.	Чисто активная нагрузка $Z_{вх ант} = 0,5 \cdot R_{вх ант} + j0$			
	Экспоненциальный профиль (для нечётных вариантов n)	$0,5 \cdot \lambda$	...	...
		$1,0 \cdot \lambda$	...	...
		$1,5 \cdot \lambda$	...	...
		$2,0 \cdot \lambda$	...	...

1.4.5 Расчёт и моделирование согласующих параллельных шлейфов

1.4.5.1 Используя выражения (1.24), (1.28)—(1.30) и калькулятор *TXLine*, рассчитайте требуемые физические параметры согласующего параллельного шлейфа по варианту **КШ** или **РШ** при подключении к комплексной нагрузке $Z_{вх ант} = R_{вх ант} + jX_{вх ант}$ (**Zn1**) и занесите их в сводную таблицу результатов исследования, пример оформления которой представлен в таблице 1.7.

Ширину выходного отрезка МЛП при этом рассчитайте соответствующей сопротивлению $R_{вх ант}$.

Таблица 1.7 — Результаты исследования согласующего параллельного шлейфа

№	Случай входного сопротивления антенны (сопротивление нагрузки)			
	Параметр/характеристика СУ	Ед. изм.	Расчёт	Модель
4.1. / 4.3.	Комплексная нагрузка $Z_{вх ант} = R_{вх ант} + jX_{вх ант}$			
	Длина отрезка шлейфа $l_{КШ} / l_{РШ}$	мм	...	...
	Волновое сопротивление шлейфа $r_{КШ} / r_{РШ}$	Ом	...	—
	Ширина отрезка шлейфа $W_{КШ} / W_{РШ}$	мм	...	...
	Расстояние от нагрузки до точки подключения $l_{вкл КШ} / l_{вкл РШ}$	мм	...	...
	Ширина выходного отрезка МЛП $W_{вкл КШ} / W_{вкл РШ}$	мм	...	...
	Относительная полоса согласования КШ/РШ $\xi_{КШ} / \xi_{РШ}$	%	—	...

4.2., 4.4.	Комплексная нагрузка $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} - jX_{\text{вх ант}}$			
	Длина отрезка шлейфа $l_{\text{КШ}} / l_{\text{РШ}}$	мм	...	...
	Волновое сопротивление шлейфа $\rho_{\text{КШ}} / \rho_{\text{РШ}}$	Ом	...	—
	Ширина отрезка шлейфа $W_{\text{КШ}} / W_{\text{РШ}}$	мм	...	...
	Расстояние от нагрузки до точки подключения $l_{\text{вкл КШ}} / l_{\text{вкл РШ}}$	мм	...	...
	Ширина выходного отрезка МЛП $W_{\text{вкл КШ}} / W_{\text{вкл РШ}}$	мм	...	...
	Относительная полоса согласования КШ/РШ $\xi_{\text{КШ}} / \xi_{\text{РШ}}$	%	—	...

1.4.5.2 Для чётных вариантов.

Создайте в *MWO* новую схему, которую назовите, например, «4 Shortened Stub», и соберите её аналогично тому, как показано на рисунке 1.57. Элемент *MTEE* (*Microstrip TEE junction*) представляет собой ветвление трёх отрезков МЛП. На конце шунт заземляется с помощью элемента *Ground*, который добавляется на схему нажатием кнопки « GND ».

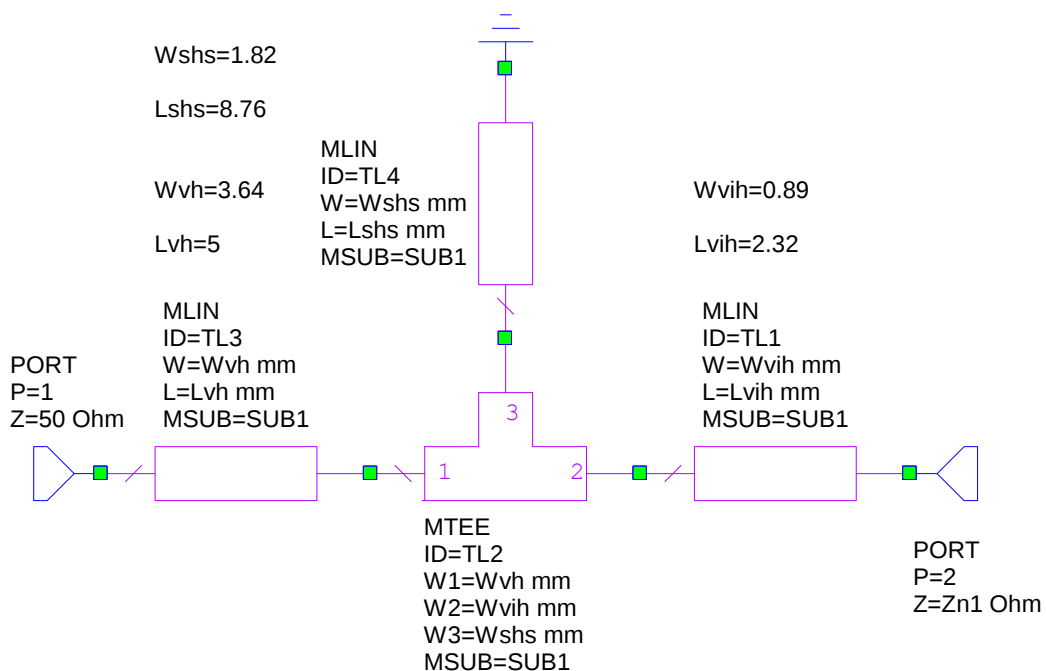


Рисунок 1.57 — Схема с короткозамкнутым шунтом

1.4.5.3 Используя инструмент *Tune Tool*, подстройте значения переменных W_{shs} , L_{shs} , W_{vih} , L_{vih} таким образом, чтобы добиться наилучшего согласования на центральной частоте f_0 и как можно более широкополосного согласования.

Сохраните в отчёт полученную схему, топологию СУ, а также полученный график КСВ. Измерьте и занесите в таблицу относительную полосу согласования ξ .

1.4.5.4 Задайте сопротивление выходного порта $Z_{\text{ВХ ант}} = R_{\text{ВХ ант}} - jX_{\text{ВХ ант}}$ (**Zn2**). Действуя аналогично п.п. 1.4.5.1—1.4.5.3, рассчитайте физические параметры КШ, и подстройте с помощью *Tune Tool* переменные для достижения качественного согласования. Аналогично сохраните в отчёт схему и топологию СУ, график КСВ, а также измеренное значение относительной полосы согласования ξ .

1.4.5.5 Для нечётных вариантов.

Создайте в *MWO* новую схему, которую назовите, например, «4 **Opened Stub**», и соберите её аналогично тому, как показано на рисунке 1.58. На конце шлейф нагружается на холостой ход с помощью элемента **MOPEN** (*Microstrip OPEN circuit with end effect*), который имитирует размыкание отрезка МЛП.

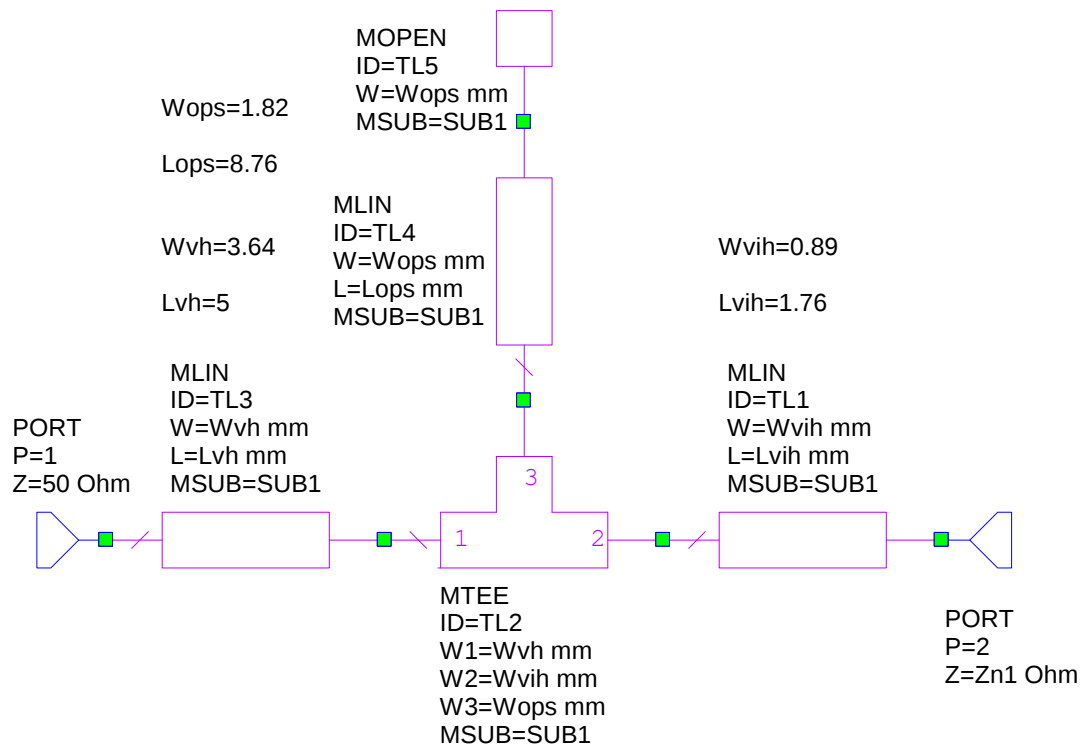


Рисунок 1.58 — Схема с разомкнутым шлейфом

1.4.5.6 Используя инструмент *Tune Tool*, подстройте значения переменных W_{ops} , L_{ops} , W_{vih} , L_{vih} таким образом, чтобы добиться наилучшего согласования на центральной частоте f_0 и как можно более широкополосного согласования.

Сохраните в отчёт полученную схему, топологию СУ, а также полученный график КСВ. Измерьте и занесите в таблицу относительную полосу согласования ξ .

1.4.5.7 Задайте сопротивление выходного порта $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} - jX_{\text{вх ант}}$ (Zn2). Действуя аналогично п.п. 1.4.5.1, 1.4.5.6, рассчитайте физические параметры РШ, и подстройте с помощью *Tune Tool* переменные для достижения качественного согласования. Аналогично сохраните в отчёт схему и топологию СУ, график КСВ, а также измеренное значение относительной полосы согласования ξ .

1.4.6 Расчёт и моделирование четвертьволновых трансформаторов с согласующим параллельным шлейфом

1.4.6.1 Используя выражения (1.31)—(1.35) и калькулятор *TXLine*, рассчитайте требуемые физические параметры ЧВТ и РШ при подключении к комплексной нагрузке $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$ (Zn1) и занесите их в сводную таблицу результатов исследования, пример оформления которой представлен в таблице 1.8. Ширину выходного отрезка МЛП $W_{\text{вкл ЧВТ}}$ при этом рассчитайте соответствующей сопротивлению 50 Ом.

Таблица 1.8 — Результаты исследования четвертьволнового трансформатора с согласующим параллельным шлейфом

№	Случай входного сопротивления антенны (сопротивление нагрузки)			
	Параметр/характеристика СУ	Ед. изм.	Расчёт	Модель
5.1., 5.3.	Комплексная нагрузка $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + jX_{\text{вх ант}}$			
	Длина ЧВТ $l_{\text{ЧВТ КШ}} / l_{\text{ЧВТ РШ}}$	мм	...	...
	Волновое сопротивление ЧВТ $\rho_{\text{ЧВТ}}$	Ом	...	—
	Ширина ЧВТ $W_{\text{ЧВТ КШ}} / W_{\text{ЧВТ РШ}}$	мм	...	...
	Длина шлейфа $l_{\text{КШ}} / l_{\text{РШ}}$	мм	...	...
	Волновое сопротивление шлейфа $\rho_{\text{КШ}} / \rho_{\text{РШ}}$	Ом	...	—
	Ширина шлейфа $W_{\text{КШ}} / W_{\text{РШ}}$	мм	...	...
	Расстояние от нагрузки до точки подключения $l_{\text{вкл ЧВТ КШ}} / l_{\text{вкл ЧВТ РШ}}$	мм	...	...
	Ширина выходного отрезка МЛП $W_{\text{вкл ЧВТ КШ}} / W_{\text{вкл ЧВТ РШ}}$	мм	...	...
	Относительная полоса согласования $\xi_{\text{КШ}} / \xi_{\text{РШ}}$	%	—	...
5.2., 5.4.	Комплексная нагрузка $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} - jX_{\text{вх ант}}$			
	Длина ЧВТ $l_{\text{ЧВТ КШ}} / l_{\text{ЧВТ РШ}}$	мм	...	...
	Волновое сопротивление ЧВТ $\rho_{\text{ЧВТ}}$	Ом	...	—
	Ширина ЧВТ $W_{\text{ЧВТ КШ}} / W_{\text{ЧВТ РШ}}$	мм	...	...

	Длина шлейфа $l_{\text{КШ}} / l_{\text{РШ}}$	мм	...	...
	Волновое сопротивление шлейфа $\rho_{\text{КШ}} / \rho_{\text{РШ}}$	Ом	...	—
	Ширина шлейфа $W_{\text{КШ}} / W_{\text{РШ}}$	мм	...	...
	Расстояние от нагрузки до точки подключения $l_{\text{ВКЛ ЧВТ КШ}} / l_{\text{ВКЛ ЧВТ РШ}}$	мм	...	...
	Ширина выходного отрезка МЛП $W_{\text{ВКЛ ЧВТ КШ}} / W_{\text{ВКЛ ЧВТ РШ}}$	мм	...	...
	Относительная полоса согласования $\xi_{\text{КШ}} / \xi_{\text{РШ}}$	%	—	...

1.4.6.2 Для нечётных вариантов.

Создайте в *MWO* новую схему, которую назовите, например, «5 *QWT with Shortened Stub*», и соберите её аналогично тому, как показано на рисунок 1.59.

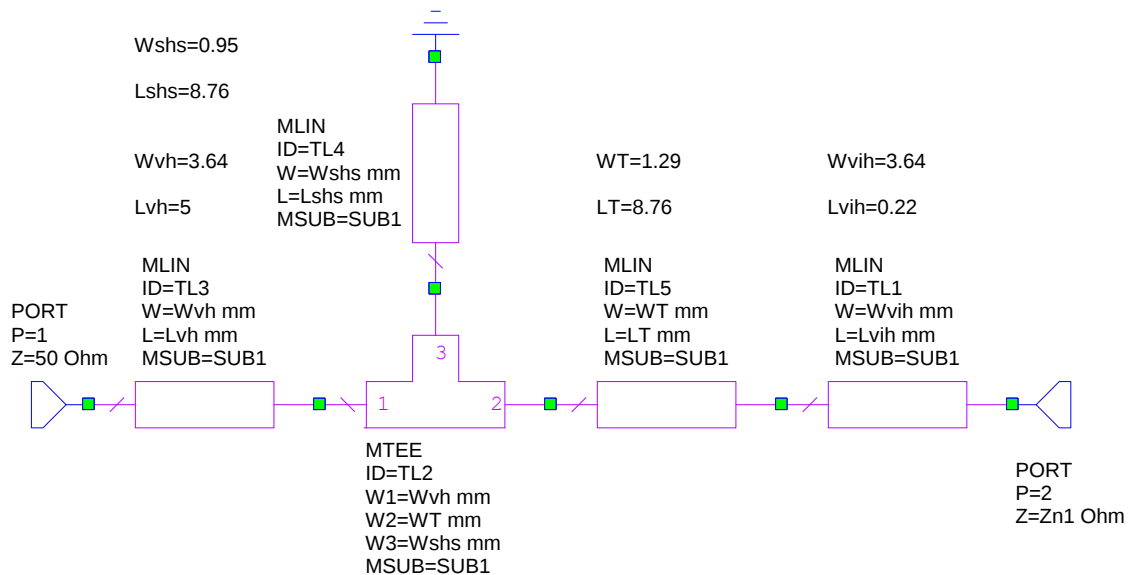


Рисунок 1.59 — Схема с четвертьволновым трансформатором и короткозамкнутым шунтом

1.4.6.3 Используя инструмент *Tune Tool*, подстройте значения переменных W_{shs} , L_{shs} , W_{T} , L_{T} , W_{vih} , L_{vih} таким образом, чтобы добиться наилучшего согласования на центральной частоте f_0 и как можно более широкополосного согласования.

Сохраните в отчёт полученную схему, топологию СУ, а также полученный график КСВ. Измерьте и занесите в таблицу относительную полосу согласования ξ .

1.4.6.4 Задайте сопротивление выходного порта $Z_{\text{ВХ ант}} = R_{\text{ВХ ант}} - jX_{\text{ВХ ант}}$ (Z_{n2}). Действуя аналогично п.п. 1.4.6.1—1.4.6.3, рассчитайте физические

параметры КШ, и подстройте с помощью *Tune Tool* переменные для достижения качественного согласования. Аналогично сохраните в отчёт схему и топологию СУ, график КСВ, а также измеренное значение относительной полосы согласования ξ .

1.4.6.5 Для чётных вариантов.

Создайте в *MWO* новую схему, которую назовите, например, «5 QWT with Opened Stub», и соберите её аналогично тому, как показано на рисунок 1.60.

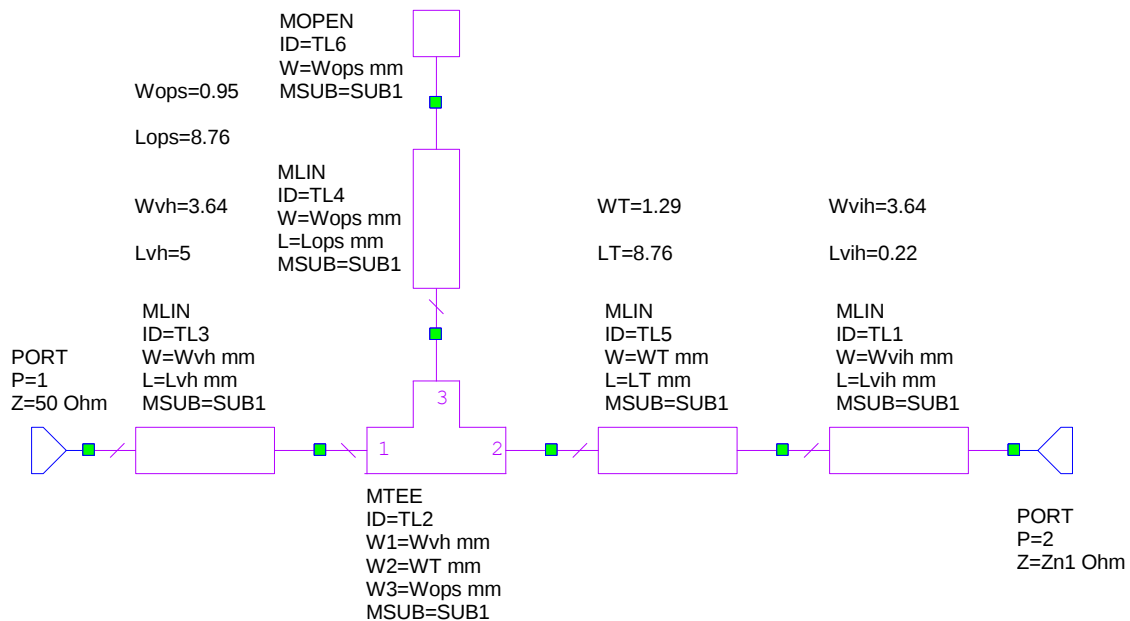


Рисунок 1.60 — Схема с разомкнутым шлейфом

1.4.6.6 Используя инструмент *Tune Tool*, подстройте значения переменных $Wops$, $Lops$, WT , LT , $Wvih$, $Lvih$ таким образом, чтобы добиться наилучшего согласования на центральной частоте f_0 и как можно более широкополосного согласования.

Сохраните в отчёт полученную схему, топологию СУ, а также полученный график КСВ. Измерьте и занесите в таблицу относительную полосу согласования ξ .

1.4.6.7 Задайте сопротивление выходного порта $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} - jX_{\text{вх ант}}$ ($Zn2$). Действуя аналогично п.п. 1.4.6.1, 1.4.6.6, рассчитайте физические параметры РШ, и подстройте с помощью *Tune Tool* переменные для достижения качественного согласования. Аналогично сохраните в отчёт схему и топологию СУ, график КСВ, а также измеренное значение относительной полосы согласования ξ .

Сделайте выводы о качестве согласования с помощью комбинации ЧВТ и согласующего параллельного шлейфа.

1.5 Содержание отчёта

1.5.1 Цель работы.

1.5.2 Ход выполнения работы с приведением всех указанных промежуточных результатов, включая исследуемые схемы, полученные графические зависимости с комментариями, расчёты, сводные таблицы результатов и промежуточные выводы.

1.5.3 Сводная таблица, пример которой представлен в таблице 1.9, в которую занесены результаты исследования всех перечисленных типов СУ.

Таблица 1.9 — Рекомендуемое оформление сводной таблицы результатов выполнения лабораторной работы

№	Случай входного сопротивления антенны (сопротивление нагрузки)	
	Тип СУ	Относительная полоса согласования ξ , %
	Чисто активная нагрузка $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} + j0$	
1.1.	Четвертьволновый трансформатор	...
2.1.	Двухступенчатый четвертьволновый трансформатор	...
3.1.	Трансформатор на основе плавного перехода (с линейным профилем) (для чётных вариантов N)	...
4.1.	Трансформатор на основе плавного перехода (с экспоненциальным профилем) (для нечётных вариантов N)	...
	Комплексная нагрузка $Z_{\text{вх ант}} = R_{\text{вх ант}} \pm jX_{\text{вх ант}}$	
1.3.	Четвертьволновый трансформатор	...
2.2.	Двухступенчатый четвертьволновый трансформатор	...
4.1.	Короткозамкнутый шунт (для чётных вариантов N)	...
4.3.	Разомкнутый шлейф (для нечётных вариантов N)	...
5.1.	Четвертьволновый трансформатор с короткозамкнутым шунтом (для нечётных вариантов N)	...
5.3.	Четвертьволновый трансформатор с разомкнутым шлейфом (для чётных вариантов N)	...

1.5.4 Подробные выводы, в которых отражены основные положения, полученные из проведённых исследований, и приведены пояснения полученных результатов.

1.6. Контрольные вопросы

1.6.1 Перечислите и поясните основные параметры, характеризующие качество согласования антенны с фидером. Раскройте физический смысл коэффициента стоячей волны и комплексного коэффициента отражения.

1.6.2 Поясните принцип действия и область применения четвертьволнового трансформатора. Запишите формулу для расчёта его волнового сопротивления и объясните, почему данное устройство является узкополосным.

1.6.3 Объясните причину узкополосности четвертьволнового трансформатора. Предложите и поясните метод увеличения относительной полосы согласования на основе многоступенчатых трансформаторов.

1.6.4 Раскройте принцип компенсации реактивной составляющей входного сопротивления нагрузки с помощью согласующих шлейфов. В каких случаях целесообразно применять короткозамкнутый шунт, а в каких — разомкнутый шлейф?

1.6.5 Поясните методику согласования комплексной нагрузки с помощью одиночного параллельного шлейфа, включённого на определённом расстоянии от нагрузки. Какие параметры необходимо рассчитать для его реализации?

1.6.6 Опишите комбинированный метод согласования комплексной нагрузки с использованием четвертьволнового трансформатора и параллельного шлейфа. В чём заключаются преимущества данного метода по сравнению с использованием только шлейфа?

1.6.7 Сравните эффективность трансформаторов на основе плавных переходов с четвертьволновыми трансформаторами. Объясните, как профиль изменения ширины проводника (линейный, экспоненциальный) и длина перехода влияют на широкополосные характеристики.

1.6.8 Перечислите и охарактеризуйте основные геометрические и электрические параметры МЛП.

1.6.9 Поясните, каким образом в САПР *AWR Microwave Office* осуществляется моделирование частотных характеристик СВЧ-устройств. Опишите назначение и порядок настройки основных окон проекта (*Project Options*, *Frequencies*), а также назначение основных элементов в проекте.

1.6.10 Раскройте методику измерения коэффициента стоячей волны и коэффициента передачи в *AWR Microwave Office*. Поясните, как по полученным графикам определить относительную полосу согласования.

1.6.11 Опишите назначение и порядок работы с калькулятором линий передачи *TXLine* в *AWR Microwave Office*. Какие параметры МЛП являются входными, а какие — расчётными для данного инструмента?

1.6.12 Поясните, для чего в процессе проектирования используется инструмент *Tune Tool*. Опишите методику параметрической оптимизации геометрических размеров согласующего устройства с его помощью.

1.6.13 Объясните, как осуществляется переход от схемотехнической модели согласующего устройства к его топологии в *AWR Microwave Office*. Что представляет собой топология устройства и какую информацию она несёт?

1.6.14 Проанализируйте основные сложности, возникающие при широкополосном согласовании реальных антенн. Как влияет на работу согласующего устройства изменение входного сопротивления антенны в полосе частот?

1.6.15 Сравните рассмотренные в работе типы согласующих устройств (четвертьволновые трансформаторы, шлейфы, плавные переходы) по следующим критериям: относительная полоса согласования, сложность расчёта и реализации, габариты. Для каких практических задач целесообразно применение каждого из них?

1.6.16 Рассчитайте волновое сопротивление и физическую длину четвертьволнового трансформатора, предназначенного для согласования фидера с волновым сопротивлением 50 Ом и чисто активной нагрузки 100 Ом на частоте 2 ГГц. Диэлектрическая проницаемость подложки $\varepsilon = 4,5$, толщина подложки $H = 1$ мм.

1.6.17 Определите расстояние от нагрузки и длину короткозамкнутого шунта, необходимые для согласования антенны с входным сопротивлением $Z_{\text{вх ант}} = 75 + j50$ Ом с фидером 50 Ом на частоте 3 ГГц. Волновое сопротивление шунта принять равным 50 Ом.

1.6.18 Рассчитайте волновые сопротивления двухступенчатого четвертьволнового трансформатора для согласования сопротивлений 50 Ом и 200 Ом. Объясните, почему такой трансформатор обеспечивает более широкую полосу согласования по сравнению с одноступенчатым.

1.6.19 Для согласования антенны с входным сопротивлением $Z_{\text{вх ант}} = 120 - j80$ Ом с фидером 50 Ом на частоте 1,5 ГГц предложите структуру на основе четвертьволнового трансформатора и параллельного шлейфа. Рассчитайте волновое сопротивление и длину трансформатора, а также параметры шлейфа (тип, длину, расстояние до нагрузки).

1.6.20 Сравните ширину полосы согласования одноступенчатого и двухступенчатого трансформаторов при согласовании сопротивлений 50 Ом и 150 Ом. Центральная частота — 2 ГГц. Объясните, как увеличение числа ступеней влияет на полосу пропускания.

Библиографический список

1. Антенны : учебное пособие для вузов / Ю. Т. Зырянов, П. А. Федюнин, О. А. Белоусов [и др.]. — 7-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2025. — 412 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/503607> (дата обращения: 01.12.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей. — ISBN 978-5-507-51077-1. — Текст : электронный.
2. Оформление текстовых работ : учебно-методическое пособие для преподавателей и обучающихся всех форм обучения по всем направлениям и специальностям кафедры «Радиоэлектронные системы и технологии» / Севастопольский государственный университет ; сост. В. Г. Слезкин. — Севастополь : СевГУ, 2024. — 29 с. — Текст : непосредственный.
3. Головин, В. В. Проектирование антенных систем / В. В. Головин, Ю. Н. Тыщук, И. Л. Афонин. — Москва : Центркаталог, 2020. — 152 с. — (Вузовский учебник). — ISBN 978-5-903268-42-9. — Текст : непосредственный.
4. Устройства СВЧ и антенны : учеб. для студ. вузов, обуч. по напр. подгот. "Радиотехника" / Д. И. Воскресенский [и др.] ; ред. Д. И. Воскресенский. - М. : Радиотехника, 2006. - 376 с. : ил. - (Учебник для вузов). - Библиогр.: с. 371 (22 назв.). - ISBN 5-88070-086-0. — Текст : непосредственный.
5. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика : учебник / О. И. Фальковский. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 432 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/210371> (дата обращения: 01.12.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей. — ISBN 978-5-8114-0980-8. — Текст : электронный.

Приложение А

Образец оформления титульного листа отчёта по лабораторной работе

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Высшая технологическая школа «Севастопольский приборостроительный институт»,
Инженерный факультет

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

ОТЧЁТ

по лабораторной работе № 1

«Исследование согласующих устройств на основе
микрополосковых линий передачи в *AWR Microwave Office*»

по дисциплине

«Антенные системы»

Выполнил: студент _____

Группа: _____

Отметка о защите: _____

Принял: _____

Севастополь

20__

Учебное издание

АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ

АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Учебно-методическое пособие

Составители: **Головин** Владислав Викторович,
Ткаченко Михаил Олегович, **Манько** Александр Сергеевич

В авторской редакции

Изд. № 227/2025. Объем 4,5 п. л. Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 4,17.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»