



Петухова Н.А.

**СОГЛАСОВАНИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧ
С ПОМОЩЬЮ ОТРЕЗКА
ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА**

Монография

Новосибирск
2016

УДК 621,37

ББК 32.845

ПЗ1

Рецензенты:

Ахметов С.М. д-р техн. наук, проф. Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, академик РАЕН, действительный член (академик);

Ахмеднабиев Р.М. канд. техн. наук, доц. Полтавского национального технического университета им. Ю. Кондратюка.

ISBN 978-5-4379-0487-9

Петухова Н.А.

ПЗ1 «Согласование линии передач с помощью отрезка запердельного волновода»: – Монография. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2016. – 70 с.

В работе рассматривается проблема согласования линии передачи в СВЧ диапазоне. Для решения данной проблемы проводится исследование трансформатора проводимостей на основе отрезка запердельного волновода. В основе этого согласующего устройства лежит новый принцип трансформации активных частей проводимости. Проводится вывод формул активной и реактивной части проводимости, по которым были получены графики зависимости нормированной активной и реактивной части входной проводимости от длины волны при различных ϵ (диэлектрическая проницаемость).

Также в работе представлен вывод формулы для определения оптимальной длины запердельного волновода для обеспечения согласования линии передач в СВЧ диапазоне. Кроме того, представлена новая конфигурация диафрагмы для обеспечения компенсации реактивной проводимости.

ББК 32.845

ISBN 978-5-4379-0487-9

© Петухова Н.А., 2016

© АНС «СибАК», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОГЛАСОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ОТРЕЗКА ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА.....	10
1.1. Описание конструкции исследуемого устройства	10
1.2. Анализ согласования волновода с помощью эквивалентной длинной линии	11
1.2.1 Вывод формул для активной и реактивной частей проводимости.....	11
1.2.2. Вывод формул для определения оптимальной длины запердельного волновода.....	23
1.2.3 Анализ формул для активной и реактивной частей проводимости.....	27
1.3 Анализ согласования с учетом потерь в диэлектрике.	28
ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ РЕАКТИВНОЙ ДИАФРАГМЫ	30
2.1. Конструкция диафрагмы	30
2.2. Вывод формул для расчета реактивной проводимости диафрагмы	32
2.3. Диафрагма и высшие типы	34
2.4. Распределение поля на щелевом отверстии, прорезанном в диафрагме	38

ГЛАВА 3. УЧЕТ ВЫСШИХ ТИПОВ ПОЛЯ В ВОЛНОВОДЕ.....	42
3.1. Вывод формул для входной проводимости с учетом поправочного коэффициента для основного типа поля. ..	42
ГЛАВА 4. АЛГОРИТМ СОГЛАСОВАНИЯ.....	50
4.1. Согласование активной части входного сопротивления	50
4.2. Согласование реактивной части входной проводимости.....	50
4.3. Оценка полосы работы диафрагмы.....	51
ГЛАВА 5. ЛАБОРАТОРНЫЙ МАКЕТ.....	54
5.1. Описание лабораторной установки и порядок выполнения работы	54
ГЛАВА 6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	59
6.1. Пример проведения исследования.....	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	67

ВВЕДЕНИЕ

Радиосистемы, работающие в диапазоне от 30 МГц до 300 ГГц, обычно можно представить в виде устройств, соединенных отрезками линии передачи. Часть такой системы, расположенной между начальным и оконечным устройствами, называют трактом СВЧ или цепью СВЧ. Подробный тракт осуществляет передачу электромагнитной энергии от передатчика к антенне или от антенны к приемнику, обеспечивает требуемый режим работы выходных и входных цепей передатчика, выполняет частотное и поляризационное разделение передаваемых сигналов и ряд других функций. Наиболее распространенными элементами СВЧ-цепей являются отрезки линий передачи, переходные и стыковые узлы между линиями разных типов, согласующие и настроечные элементы, сумматоры, делители и ответвители мощности и др.

Обстоятельством, оказывающим большое влияние на работу передающих линий СВЧ, является их протяженность, сравнимая с длиной волны, а в большинстве случаев и превосходящая ее. Наиболее часто используемой передающей линией диапазона СВЧ является волновод [10; 16; 17; 18; 19; 20] – металлическая трубка, по внутренней полости которой осуществляется передача энергии. Основными преимуществами прямоугольного волновода являются: достаточно большая мощность передаваемого сигнала и практически полное отсутствие излучения во внешнюю среду. Помимо волновода, также используются такие линии передачи, как двухпроводные и коаксиальные линии, однако по сравнению с волноводными линиями они обладают рядом существенных недостатков.

Наиболее важной задачей сверхвысоких частот является обеспечение согласования [6; 7; 8; 9] линии передачи. Под согласованием линии передачи с нагрузкой понимают мероприятия по обеспечению передачи возможно большей части передаваемой линией мощности от генератора в нагрузку в заданном диапазоне частот.

Общие принципы согласования нагрузки с линией передачи.

Идеальное согласование предусматривает передачу всей передаваемой от генератора мощности в нагрузку. В широкополосных системах связи рассогласование линии с нагрузкой может вызывать искажение передаваемой информации и способствовать значительному увеличению уровня шумов в тракте. Обычно коэффициент отражения в таких системах во всей рабочей полосе частот не должен превышать

0,02 ... 0,05 (КСВН от 1,04 ... 1,1). Линия будет идеально согласована с нагрузкой, если в ней отсутствуют отраженные волны, то есть согласующее устройство должно устранить отраженную от нагрузки волну. Эту задачу можно решить двумя способами: либо поглотить отраженную волну в согласующем устройстве (соответственно при минимальном затухании падающей волны), либо погасить (компенсировать) волну, отраженную от нагрузки новой волной, отраженной от согласующего устройства.

Согласование может осуществляться как с преобразованием типа волны, так и без преобразования типа волны. Согласование с преобразованием типа волны также называют возбуждением [7]. При согласовании необходимо выполнить ряд условий.

Первое условие заключается в возможности существования требуемого типа волны в нагрузке. Для этого требуется правильно подобрать форму и рассчитать размеры нагрузки.

Второе условие заключается в возможно полном совпадении структуры поля в нагрузке и линии передач. Для его осуществления применяются преобразователи типов волн.

Третье условие с точки зрения теории цепей заключается в равенстве выходного сопротивления передающей линией комплексно сопряженному входному сопротивлению нагрузки. Так как в случае режима бегущей волны в линии передачи ее выходное сопротивление чисто активное, то необходимо для компенсации реактивной составляющей сопротивления нагрузки вводить в линию передачи реактивные элементы.

С точки зрения теории электромагнитного поля, при отражении от нагрузки образующаяся отраженная волна компенсируется волной, отраженной от реактивного элемента, вводимого в линию передачи, если эти волны будут равны по амплитуде и противоположны по фазе, то есть используется явление интерференции волн.

В результате введения согласующего элемента часть волны от него отражается и в направлении нагрузки, а затем снова к устройству и так далее. При этом на участке между согласующим устройством и нагрузкой образуется, за счет этих переотражений, стоячая волна, запасаящая энергию, которая в нагрузку уже не поступает. Величина этой запасенной энергии зависит и от расстояния между согласующим элементом и нагрузкой. Чем больше это расстояние, тем большая энергия запасается. Следовательно, согласующий элемент должен по возможности ближе располагаться к нагрузке.

В теории цепей под режимом согласования обычно понимают случай, когда сопротивление нагрузки, включенное в конце линии,

в точности равно характеристическому сопротивлению линии. При этом отраженная волна отсутствует. Коэффициент отражения ρ оказывается равен нулю; коэффициент стоячей волны (КСВ) равен 1.

В случае согласования мощность, поступающая в нагрузку от генератора, имеет небольшую величину. В случае отсутствия согласования возникает ряд нежелательных эффектов:

- уменьшение мощности $P_{\text{Н}}$, поступающей в нагрузку

$$P_{\text{Н}} = P_{\text{ПАД}} - P_{\text{ОТР}} = P_{\text{ПАД}}(1 - |\rho|^2),$$

где: $P_{\text{ПАД}}$ – мощность падающей волны, соответствующая наибольшей мощности, которую можно получить в рассматриваемом режиме при идеальном согласовании нагрузки с линией;

$P_{\text{ОТР}}$ – мощность отраженной волны;

- уменьшается предельное значение передаваемой мощности из-за электрического пробоя в тракте. Электрическая прочность передающей линии при рассогласованной нагрузке снижается в КСВ число раз по сравнению с электрической прочностью согласованной линии:

$$P_{\text{ПРОБ}} = P_{\text{ПРОБmax}} \frac{1}{\text{КСВ}},$$

где: $P_{\text{ПРОБmax}}$ – наибольшая величина пробивной мощности, при $\text{КСВ}=1$;

- уменьшается широкополосность передающего тракта;
- увеличиваются активные потери в линии передачи.

Указанное выше и является причиной того, что обеспечение согласования в линии передачи является одной из наиболее распространенных и важных задач техники СВЧ. С этой проблемой приходится часто сталкиваться при разработке приборов СВЧ.

Необходимость согласования возникает в случаях, когда с передающей линией соединяется заведомо рассогласованная нагрузка, либо, что практически то же самое, при сопряжении линий с разными волновыми (эквивалентными) сопротивлениями.

Для получения согласования произвольной нагрузки $Z_{\text{Н}}$ с линией передачи вблизи от нагрузки должен быть включен согласующий четырехполосник. Наибольший интерес представляет согласование с помощью недиссипативного четырехполосника. В этом случае согласование происходит без внесения активных потерь, но выполнение трансформатора в «классическом» виде не представляется возможным.

Сами передающие линии также обладают хорошими трансформирующими свойствами. В технике СВЧ такой вид согласующих устройств называют трансформаторами полных сопротивлений. Наиболее распространенные из них: одно- и двухшлейфное согласование, четвертьволновый трансформатор и др.

Каждый из перечисленных видов согласования обладает набором недостатков, как, конечно, и достоинств.

В данном издании проводится исследование трансформатора проводимостей на основе отрезка запердельного волновода [4; 10; 11; 16–18] (волновод называют запердельным, если у него поперечные размеры менее предельных, при которых невозможно распространение электромагнитной волны). В основе этого согласующего устройства лежит новый принцип трансформации активных частей проводимости. Для компенсации реактивной части проводимости, возникающей в запердельном волноводе, используется шунтирующая диафрагма специальной конфигурации.

Предлагаемый метод согласования обладает рядом преимуществ:

- малые габариты согласующего устройства по сравнению с аналогичными устройствами, применяемыми для согласования;
- трансформация активной проводимости (главным образом, за счет размеров запердельного волновода);
- компенсация реактивной проводимости за счет реактивной диафрагмы, расположенной на стыке между трехсантиметровым волноводом, заполненным воздухом, и запердельным волноводом, также заполненным воздухом;
- согласование в широкой полосе частот;
- простота конструкции.

Но при этом также выдвигаются требования, предъявляемые к волноводам, предназначенным для практического использования в качестве передающей линии:

- потери в волноводе должны быть, по возможности, минимальными;
- волновод должен иметь достаточно высокую электрическую прочность передачи большой мощности от генератора к нагрузке;
- габариты и вес волновода должны быть минимальными, а технология изготовления простая;
- во всем рабочем диапазоне частот передача энергии по волноводу должна осуществляться только одним типом волны.

В общем, отражения электромагнитных волн от поверхностей изотропных и анизотропных [3], линейных и нелинейных сред достаточно хорошо изучены и используются как для определения

электродинамических параметров материалов и сред, так и при конструировании волноводных устройств различного назначения (от микроволнового до оптического) [1; 9]. При определенных условиях волноводные структуры проявляют свойства запердельности. Считается, что в этих условиях волноводы не представляют интереса для передачи сигналов, хотя иногда свойства запердельности использовались на практике: например, запердельные участки волноводов используются в качестве нагрузок высокочастотных генераторов микроволнового диапазона [14]. Интерес к запердельным волноводам возник в последнее время в связи с бурным развитием измерительной субволновой техники (измерение параметров объектов с размерами, существенно меньшими длины волны исследуемого диапазона длин волн) [2; 5; 6; 21–24]. Запердельные волноводы являются единственной возможностью доступа к объектам субволновых размеров и используются в измерительной технике, несмотря на сложность измерений, прежде всего, из-за высокого уровня затухания (до ~ 80 – 90 дБ). Вместе с тем, в работах [10; 11; 12; 13] показана возможность согласования линий передач с помощью отрезка запердельного волновода.

Монография

Петухова Н.А.

**СОГЛАСОВАНИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧ
С ПОМОЩЬЮ ОТРЕЗКА
ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА**

Подписано в печать 12.10.2016. Формат бумаги 60x84/16.
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 4,375. Тираж 550 экз.

Издательство АНС «СибАК»
630049, г. Новосибирск, Красный проспект, 165, офис 4.
E-mail: mail@sibac.info

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного
оригинал-макета в типографии Allprint
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 3