**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСА ВОЛНОВОДНЫХ НАГРУЗОК С ПОМОЩЬЮ ИМПЕДОМЕТРА.**

**Цель работы**

1. Изучить теорию распространения электромагнитных волн в регулярных линиях передачи с Т-волной при гармоническом воздействии.

2. Изучить особенности различных режимов работы линии передачи.

3. Провести экспериментальные исследования режимов стоячей и смешанных волн в коаксиальной линии передачи с Т-волной.

**Домашнее задание:** изучить теоретический раздел работы.

**1. Основы теории регулярной линии передачи с Т-волной при гармоническом воздействии**

На практике для передачи энергии высокочастотных колебаний от источника в нагрузку (например, от радиопередатчика к антенне) часто используются отрезки регуляр­ных линий передачи. Если длина регулярной линии передачи существенно превышает длину волны в линии λл, то такая линия называется *длинной.* Принципиально в длинных линиях возможно одновременное существование двух волн, распространяющихся навстречу друг другу. Одна из этих волн формируется подключенным к линии источником (генератором) электромагнитных колебаний и называется падающей (прямой). Другая волна возникает из-за отражения падающей волны от нагрузки линии и называется отраженной (обратной) – она распространяется в направлении, обратном падающей волне. Все разнообразие процессов, происходящих в длинной линии, определяется амплитудно-фазовыми соотношениями между падающей и отраженной волнами.

**Дифференциальные уравнения длинной линии.** Рассмотрим двухпроводную длинную линию, представленную на рис. 1, где *Z*н = *R*н + *jХ*н– комплексное сопротивление нагрузки; *z* – продольная координата линии, отсчитываемая от места подключения нагрузки.

Из электродинамики известно, что линия передачи может быть охарактеризована *погонными параметрами: R*1 – погонное сопротивление, Ом/м; *G*1, – погонная проводимость, См/м; *L*1, – погонная индуктивность, Гн/м; *С*1, – погонная емкость, Ф/м. Погонные сопротивление *R*1 и проводимость *G*1 зависят от электрической проводимости материала проводов и качества диэлектрика, окружающего эти провода. Чем меньше тепловые потери в металле проводов и в диэлектрике, тем меньше, соответственно, *R*1и *G*1. Погонные индуктивность *L*1 и емкость *С*1, определяются формой и размерами поперечного сечения проводов, а также расстоянием между ними. Выделим из линии элементарный участок бесконечно малой длины *dz* и рассмотрим его эквивалентную схему (рис. 2).



Рис. 1. К выводу дифференциальных уравнений длинной линии

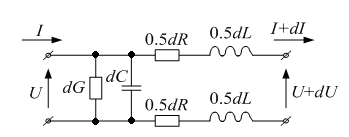


Рис. 2. Эквивалентная схема участка длиной *dz*

На этой схеме стрелками обозначены направления отсчета напряжения *U* и тока *I* в линии; *dU* и *dI* – приращения напряжения и тока в линии на элементе длины *dz .* Значения параметров схемы опре­деляются соотношениями:

*dR* = *R*1*dz*; *dG* = *G*1*dz*; (1)

*dC* = *C*1*dz*; *dL* = *L*1*dz*.

Используя эквивалентную схему, запишем выражения для прира­щений напряжения и тока:

*dU* = *I* (*dR* + *j*ω*dL*),

*dI* = *U* (*dG* + *j*ω*dC*).

Подставляя сюда значения параметров схемы из (1), получаем:

*dU* = *IZ*1*dz*, *dI = UY*1*dz,*

где *Z*1 = *R*1 + *j*ω*L*1, (Ом/м) и *Y*1 = *G*1+ *j*ω *C*1 (См/м) – погонные комплексные сопротивление и проводимость линии.

Из последних соотношений находим:

;  (2)

Эти соотношения называются *телеграфными уравнениями* длинной линии, они определяют связь между током и напряжением в любом сечении линии.

Решить телеграфные уравнения относительно напряжения и тока можно, если продифференцировать их по z:

. (3)

Также следует учесть, что

. (4)

Полученные выражения являются математическим определением регулярности длинной линии. Физический смысл (4) в том, что погонные параметры не изменяются вдоль линии.

Подставляя в (3) значения производных напряжения и тока из (2), после преобразований получаем:

,  (5)

где –  *коэффициент распространения* волны в линии*.*

Соотношения (1.5) называются *однородными волновыми уравнениями* длинной линии. Их решения известны и могут быть записаны в виде

,  (6)

где *АU* , *BU* и *АI* , *BI* – коэффициенты, имеющие единицы измерения напряжения и тока соответственно.

Решения волновых уравнений в виде (6) имеют характерный вид: первое слагаемое в них описывает падающую волну напряжения или тока, распространяющуюся от генератора к нагрузке, второе слагаемое – отраженную волну, распространяющуюся от нагрузки к генератору. Таким образом, коэффициенты *АU*, *АI* представляют собой комплексные амплитуды падающих волн напряжения и тока, а коэффициенты *BU*, *BI* – комплексные амплитуды отраженных волн напряжения и тока. Поскольку часть мощности, передаваемой по линии, может поглощаться в нагрузке, амплитуды отраженных волн не могут превышать амплитуды падающих:

; .

Направление распространения волн в (6) определяется знаком в показателях степени экспонент: "плюс" – волна распространяется в отрицательном направлении оси z; "минус" – в положительном направлении оси *z* (см. рис. 2).Так, например, для падающей волны можно записать:

; . (7)

*Коэффициент распространения волны* в линии *γ* в общем случае является комплексной величиной и может быть представлен как

, 1/м (8)

где α – коэффициент затухания волны в линии; β – коэффициент фазы.

Тогда соотношение (1.7) можно переписать в виде:

; . (9)

Коэффициент затухания *α* (1/м) определяет скорость уменьшения амплитуды волны, а коэффициент фазы *β* (1/м) – скорость изменения фазы волны вдоль линии.

Так как при прохождении падающей волной расстояния, равного длине волны в линии *λл*, фаза волны изменяется на *2π,* то коэффициент фазы связан с длиной волны *λл* соотношением

*β = 2π/λл.* (10)

При этом фазовая скорость волны в линии *vф* определяется через коэффициент фазы:

*vф = ω/β.* (11)

Групповая скорость (скорость переноса энергии вдоль линии) определяется следующим общим выражением:

*vгр = dω/dβ,* причем в электродинамике показано, что для любой линии передачи справедливо соотношение

*vф vгр=(сср)2,* где *сср* – скорость света в среде, заполняющей линию.

Фазовая скорость волны в линии передачи может быть меньшей, равной или большей скорости света в свободном пространстве, тогда как групповая скорость не может ее превысить.

В общем случае произвольной линии передачи фазовая скорость может оказаться зависящей от частоты *f* электромагнитных колебаний; это явление называют *дисперсией,* а зависимость *vф(f) –* дисперсионной характеристикой. Рассматривая распространение электромагнитных колебаний сложной формы по линии передачи, надо отметить, что дисперсия приводит к их искажениям, поскольку частотные компоненты спектра колебания получают после прохождения одинакового пути по линии различные фазовые сдвиги.

С другой стороны, явление дисперсии используется при построении, например, антенных решеток с частотным сканированием диаграммы направленности излучения.

Определим коэффициенты *А* и *В*, входящие в решения (6) волновых уравнений, через значения напряжения *U*ни тока *I*н на нагрузке. Воспользуемся первым из телеграфных уравнений (1.2) и подставим в него напряжение и ток из (6). Тогда

.

Сравнив коэффициенты при экспонентах с одинаковыми показателями степеней, получим:

*AI* *=* *AU* / *W*, *BI* *=* -*BU* / *W*, (12)

где  (Ом) – волновое сопротивление линии. *Волновым сопротивлением линии передачи* называется отношение комплексных амплитуд напряжения и тока в бегущей волне.

Перепишем (6) с учетом (12):

;  (13)

Для определения коэффициентов *А* и *В* в этих уравнениях воспользуемся условиями в конце линии *z* = 0, *U*(*z* = 0) = *U*н. Тогда из (13) при z = 0 найдем

*АU* = 0,5(*U*н + *I*н*W*); *BU* = 0,5(*U*н - *I*н*W*). (14)

Подставив полученные значения коэффициентов из (14) в (13), после преобразовании получим:

*U* = *U*н ch(*γz*) + *I*н*W*sh(*γz*); *I* = *I*н ch(*γz*) + (*U*н / *W*)sh(*γz*).

При выводе (1.15) учтены определения гиперболических синуса и косинуса:

sh(*γz*) *=* (*eγz* – *e-γz*)/2;

ch(*γz*) *=* (*eγz* + *e-γz*)/2.

Соотношения для напряжения и тока (15), так же как и (6), являются решениями однородных волновых уравнений. Их отличие состоит в том, что напряжение и ток в линии в соотношении (6) определены через амплитуды падающей и отраженной волн, а в (15) – через напряжение и ток в месте подключения нагрузки.

**Закономерности изменения напряжения и тока вдоль линии.** Рассмотрим простейший случай, когда напряжение и ток в линии опре­деляются только падающей волной, а отраженная волна отсутствует. Тогда в (6) следует положить *ВU* = 0, *ВI* = 0:

; .

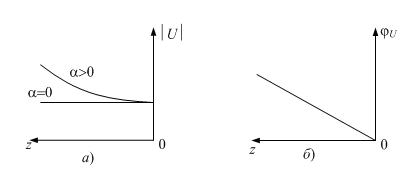


Рис. 3. Эпюры изменения амплитуды (а) и фазы (б) напряжения

в линии

На рис. 3 представлены эпюры изменения амплитуды |*U*|и фазы ϕ*U* напряжения вдоль линии. Эпюры изменения амплитуды и фазы тока имеют такой же вид. Из рассмотрения эпюр следует, что при отсутствии в линии потерь (α= 0) амплитуда напряжения в любом сечении линии не изменяется. При наличии потерь в линии (α>0)часть переносимой мощности преобразуется в тепло (происходит нагревание проводов линии и окружающего их диэлектрика), поэтому амплитуда напряжения падающей волны экспоненциально убывает в направлении распространения.

Фаза напряжения падающей волны *ϕU = βz* изменяется по линейному закону и уменьшается по мере удаления от генератора.

Рассмотрим изменение амплитуды и фазы, например, напряжения при наличии падающей и отраженной волн. Для упрощения положим, что потери в линии отсутствуют, т.е. *α = 0.* Тогда напряжение в линии можно представить в виде

 (16)

где *Γ = ВU/АU* – отношение комплексных амплитуд напряжений отраженной и падающей волн представляет собой *комплексный коэффициент отражения по напряжению.* Он характеризует степень согласования линии передачи с нагрузкой. Модуль коэффициента отражения изменяется в пределах*: 0 ≤ |Г| ≤ 1*. При этом *|Г| = 0,* т.к. при отсутствии отражения от нагрузки *ВU* = 0; *|Г| = 1*, если волна полностью отражается от нагрузки, т.е. |*ВU*| = |*АU*|.

Соотношение (16) представляет собой сумму падающей и отраженной волн. Отобразим напряжение на комплексной плоскости в виде векторной диаграммы, каждый из векторов которой определяет падающую, отраженную волны и результирующее напряжение (рис. 4).

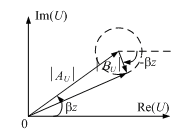


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений в линии

Из диаграммы видно, что существуют такие поперечные сечения линии, где падающая и отраженная волны складываются в фазе. Напряжение в этих сечениях достигает максимума, величина которого равна сумме амплитуд падающей и отраженной волн: *U*max = |*АU*| + |*ВU*|. Кроме того, существуют такие поперечные сечения линии, где падающая и отраженная волны складываются в противофазе. При этом напряжение достигает минимума: *U*min = |*АU*| - |*ВU*|.

Если линия нагружена на сопротивление, для которого *|Г| = 1*, т.е. амплитуда падающей и отраженной волн равны |*ВU*| = |*АU*|, то в этом случае *U*max = 2|*АU*|, а *U*min = 0. Напряжение в такой линии изменяется от нуля до удвоенной амплитуды падающей волны. На рис. 5 представлены эпюры изменения амплитуды и фазы напряжения вдоль линии при наличии отраженной волны.

По эпюре напряжения судят о степени согласования линии с на­грузкой. Для этого вводятся понятия *коэффициента бегущей волны (КБВ)* и *коэффициента стоячей волны (КСВ)*:

*КБВ* = *U*min / *U*max = (|*АU*| - |*ВU*|) / (|*АU*| + |*ВU*|) =

= (1 - |Г|) / (1 + |Г|) (17)

*КСВ* = *U*max/ *U*min= 1/ *K*БВ (18)

Эти коэффициенты находятся в пределах: 0 ≤ *КБВ* ≤ 1, 1 ≤ *КСВ* < ∞.



Рис. 5. Эпюры амплитуды (а) и фазы (б) напряжения в линии

с отраженной волной

На практике наиболее часто используется понятие коэффициента стоячей волны, так как современные измерительные приборы (панорамные измерители *КСВ*)на индикаторных устройствах отображают изменение именно этой величины в определенной полосе частот.

Важной характеристикой длинной линии является входное сопротивление линии *Z*вх*=R*вх *+ jX*вх, которое определяется в каждом сечении линии как отношение комплексных амплитуд напряжения и тока в этом сечении:

*Z*вх(*z*) *= U*(*z*) / *I*(*z*).  (19)

Так как напряжение и ток в линии изменяются от сечения к сечению, то и входное сопротивление линии изменяется относительно ее продольной координаты *z*. При этом говорят о трансформирующих свойствах линии, а саму линию рассматривают как трансформатор сопротивлений. Подробнее свойство линии трансформировать сопротивления будет рассмотрено ниже.

**Режимы работы длинной линии без потерь.** Различают три режима работы линии: режим бегущей волны, режим стоячей волны, режим смешанных волн.

*Режим бегущей волны* характеризуется наличием только падающей волны, распространяющейся от генератора к нагрузке. Отраженная волна отсутствует. Мощность, переносимая падающей волной, полностью выделяется в нагрузке. В этом режиме *ВU* = 0, |Г| = 0, *КСВ* = 1.

*Режим стоячей волны* характеризуется тем, что амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей |*ВU*| = |*АU*|, т.е. энергия падающей волны полностью отражается от нагрузки и возврашается об­ратно в генератор. В этом режиме |Г| = 1, *КСВ*= ∞.

В *режиме смешанных волн* амплитуда отраженной волны удовлетворяет условию 0 < |*ВU*| < |*АU*|, т.е. часть мощности падающей волны теряется в нагрузке, а остальная часть в виде отраженной волны возвращается обратно в генератор. При этом 0 < |Г| < 1, 1 < *K*СВ < ∞. Режимы бегущей и стоячей волн практически не реализуемы; возможно лишь приближение к этим режимам в той или иной степени. Это объясняется наличием в реальных линиях передачи различных нерегулярностей и неоднородностей, обусловленных погрешностями изготовления линии, наличием элементов крепления и т.п., вызывающих появление отраженной волны.

**Свойства линии без потерь.** В линии без потерь погонные параметры *R*1 = 0 и *G*1 = 0. Поэтому для коэффициента распространения *γ* и волнового сопротивления *W* получим

;

*α = 0; β =* ; . (20)

С учетом этого выражения для напряжения и тока (15) примут вид:

*U = Uн cos(βz) + IнWsin(βz);*

*I = Iн cos(βz) + (Uн / W) sin (βz).*  (21)

При выводе этих соотношений учтено, что *ch(jβz) = cos(βz); sh(jβz) = jsin(βz).* Рассмотрим конкретные примеры работы линии без потерь на простейшие нагрузки.

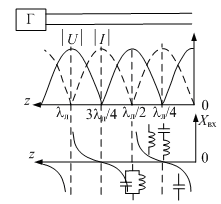


Рис. 6. Эпюры напряжения, тока и входного сопротивления

для разомкнутой линии

***Разомкнутая линия****.* В этом случае ток, протекающий через нагрузку, равен нулю (*I*н = 0), поэтому выражения для напряжения, тока и входного сопротивления в линии принимают вид:

*U = Uн cos(βz); I = j(Uн / W) sin (βz);*

*Zвх = U / I = -jWctg(βz) = jXвх; β = 2π / λл.*  (22)

На рис. 6 эти зависимости проиллюстрированы графически.

Из соотношений (22) и графиков следует, что:

* в линии, разомкнутой на конце, устанавливается режим стоячей волны, напряжение, ток и входное сопротивление вдоль линии изменяются по периодическому закону с периодом *λл / 2;*
* входное сопротивление разомкнутой линии является чисто мнимым, за исключением точек с координатами *z = nλл / 4, n = 0, 1, 2,...;*
* если длина разомкнутой линии меньше *λл /4*, то такая линия эквивалентна емкости;
* разомкнутая на конце линия длиной *λл* эквивалентна последовательному резонансному на рассматриваемой частоте контуру и имеет нулевое входное сопротивление.

***Короткозамкнутая линия.***В этом случае напряжение на нагрузке равно нулю (*U*н = 0), поэтому напряжение, ток и входное сопротивление в линии принимают вид:

*U* = *jI*н*W*sin(β*z*), *I* = *I*нcos(β*z*);

*Z*вх*=U* / *I* = *jW*tg(β*z*) *=* -*jX*вх. (23)

На рис. 7 эти зависимости проиллюстрированы графически.

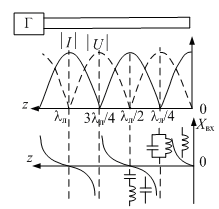


Рис. 7. Эпюры напряжения, тока и входного сопротивления

для короткозамкнутой линии

Используя результаты предыдущего раздела, нетрудно самостоятельно сделать выводы о трансформирующих свойствах короткозамкнутой линии. Отметим, что в замкнутой линии без потерь также устанавливается режим стоячей волны. Отрезок короткозамкнутой линии длиной меньше λл/4, имеет индуктивное входное сопротивление, а при длине λл/4 его входное сопротивление на рабочей частоте стремится к бесконечности. Это свойство короткозамкнутого четвертьволнового отрезка линии позволяет использовать его в практических устройствах как своего рода изолятор по отношению к току высокой частоты.

***Линия, нагруженная на емкостное сопротивление.*** Как следует из анализа работы разомкнутой линии, каждой емкости *С* на данной частоте «можно поставить в соответствие отрезок разомкнутой линии длиной меньше λл/4. Емкостное сопротивление j*XC*=1/(jω*С).* Приравняем величину этого сопротивления к входному сопротивлению разомкнутой линии длиной *l*< λл /4:

-*j* /(ω*С)* = -*jW*ctg(β*l*).

Отсюда находим длину отрезка линии *l*, имеющего реактивное входное сопротивление емкостного характера:

*l =* (*l* / β)arctg[ω*CW*].

Зная эпюры напряжения, тока и входного сопротивления разомкнутой линии, построим их для линии, работающей на емкостную нагрузку (рис. 8). Из эпюр следует, что в линии в этом случае устанавливается режим стоячей волны.

При изменении емкости эпюры сдвигаются вдоль оси *z.* В частности, при увеличении емкости емкостное сопротивление уменьшается, напряжение на емкости падает, и все эпюры сдвигаются вправо, приближаясь к эпюрам, соответствующим короткозамкнутой линии. При уменьшении емкости эпюры сдвигаются влево, приближаясь к эпюрам, соответствующим разомкнутой линии.

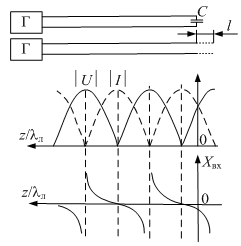


Рис. 8. Эпюры напряжения, тока и входного сопротивления для линии с емкостной нагрузкой

***Линия, нагруженная на индуктивное сопротивление.*** Как следует из анализа работы замкнутой линии, каждой индуктивности *L* на данной частоте ωможно поставить в соответствие отрезок замкнутой линии длиной меньше λл /4. Индуктивное сопротивление j*XL=j*ω*L*.Приравняем это сопротивление к входному сопротивлению замкнутой ли­нии длиной *l* < λл/4: *j*ω*L*=*jW*tg(β*l*)*.* Отсюда находим длину отрезка линии *l*, имеющего реактивное входное сопротивление индуктивного характера:

*l* = (l **/** β)arctg(ω*L* / *W*).

Зная эпюры напряжения, тока и входного сопротивления замкнутой на конце линии, построим их для линии, работающей на индуктивную нагрузку (рис. 9). Из эпюр следует, что в линии и в этом случае устанавливается режим стоячей волны. Изменение индуктивности приводит к сдвигу эпюр вдоль оси *z .* Причем с увеличением *L* эпюры сдвигаются вправо, приближаясь к эпюрам холостого хода, а с уменьшением *L* – влево по оси *z,* стремясь к эпюрам короткого замыкания.

***Линия, нагруженная на активное сопротивление.***В этом случае ток и напряжение на нагрузке *R*нсвязаны соотношением *U*н = *I*н*R*н. Выражения для напряжения и тока в линии (21) принимают вид:

*U = Uн cos(βz) + jIн(W / Rн)sin(βz);*

*I = Iн cos(βz) + j(Rн / W) sin (βz).*

Рассмотрим работу такой линии на примере анализа напряжения. Найдем из (24) амплитуду напряжения в линии:

|*U*| *= U*н*.* (25)

Отсюда следует, что можно выделить три случая: 1) *R*н *= W*;2) *R*н *> W*; 3) *R*н *< W*.

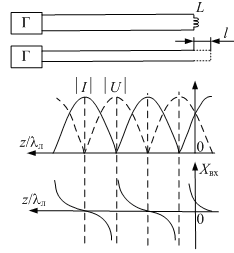


Рис. 9. Эпюры напряжения, тока и входного сопротивления для линии с индуктивной нагрузкой

В первом случае из (25) следует |*U*| = *U*н,т.е. напряжение вдоль линии остается постоянным, равным напряжению на нагрузке. Это соответствует режиму бегущей волны в линии.

Во втором случае (*W* / *R*н*<*1) анализ соотношения (25) показывает, что максимумы напряжения *U*max определяются из условий *sin2(βzmax) = 0;* *cos2(βzmax) = l*, где zmax – продольные координаты максимумов напряжения *z*max = *n*λл / 2, *п* = 0, 1, 2,... При этом напряжение в максимуме определяется равенством *U*max = *U*н. Отсюда следует, что на нагрузке линии образуется максимум напряжения. Минимумы напряжения определяются из условий *sin2 (βzmin) = 1, cos2 (βzmin) = 0, где zmin* – продольные координаты минимумов напряжения: zmin = λл / 4 + *n*λл / 2, *n* = 0, 1, 2,... При этом напряжение в минимуме определяется уравнением *U*min *=* *U*н*W* / *R*н. Таким образом, при *R*н *>* *W* КСВ = *U*max / *U*min = *R*н / *W*.

Рассуждая аналогично применительно к третьему случаю, можно показать, что при *R*н < *W* в конце линии устанавливается минимум напряжения, и *z*min = *n*λл / 2, *n* = 0, l, 2, ...; *U*min *=U*н.При этом координаты напряжения определяются равенством zmax = λл / 4 + nλл / 2, *n* = 0, 1, 2,..., а значение напряжения в максимумах *U*max= *U*н*W* / *R*н. В этом случае *КСВ*= *W* / *R*н. На рис. 10 представлены эпюры напряжения в линии для всех трех рассмотренных случаев.

Из графиков (рис. 10) следует, что при работе линии на активное сопротивление в ней устанавливается режим смешанных волн, за исключением случая *R*н = *W*,при котором устанавливается режим бегущей волны, и вся мощность выделяется в нагрузке.



Рис. 10.Эпюры напряжения в линии,нагруженной

на активное сопротивление

Определим входное сопротивление линии, нагруженной на активное сопротивление, используя выражение для напряжения и тока (24):



Выделяя здесь действительную и мнимую части, находим:

;

. (26)



Рис. 11. Эпюры напряжения и входного сопротивления в линии, нагруженной на активное сопротивление

Зависимости *R*вх и *X*вх от *z* для случая *R*н> *W* приведены на рис. 11. Здесь же представлена соответствующая эпюра напряжения. Из эпюр следует, что при увеличении сопротивления нагрузки они приближаются к эпюрам, соответствующим линии, разомкнутой на конце. Следует обратить внимание на поперечные сечения линии *z*1 и *z*2, в которых активная часть входного сопротивления линии равна волновому сопротивлению *W.* а реактивная часть имеет емкостный в точке z, или индуктивный в точке *z*2 характер. Поперечные сечения линии с такими входными сопротивлениями периодически повторяются через λл / 2. Из эпюр также следует, что в сечениях линии, в которых напряжение достигает максимума или минимума, входное сопротивление чисто активное. Это остается справедливым и для случая *R*н< *W*.

***Работа линии при произвольном комплексном сопротивлении нагрузки****.* В этом случае, как и при активной нагрузке, часть мощности падающей волны поглощается активной частью нагрузки, и в линии устанавливается режим смешанных волн. Отличие от случая активной нагрузки состоит в фазовом сдвиге, который приобретает отраженная волна в месте включения нагрузки. Этот фазовый сдвиг вызывает сдвиг кривых напряжения и тока без изменения их формы. Для иллюстрации на рис. 12 показаны эпюры напряжения и входного сопротивления в линии, нагруженной на комплексное сопротивление, причем реактивная часть этого сопротивления имеет индуктивный характер.



Рис. 12. Эпюры напряжения и входного сопротивления в линии,

нагруженной на комплексное сопротивление

Как и в случае чисто активной нагрузки, в сечениях линии, где напряжение достигает максимума или минимума, входное сопротивление линии чисто активное. Можно показать, что произведение входных сопротивлений, отстоящих один от другого на λл / 4, равно квадрату волнового сопротивления:

Zвх(z)Zвх(z + λл / 4) = W2.

Так как напряжение и ток на произвольной комплексной нагрузке связаны соотношением *U*н = *I*н*Z*н, то из (1.21) можно получить уравнение, определяющее коэффициент отражения через сопротивление нагрузки:

*Γ = (Zн - W) / (Zн + W).*

***Основные результаты теории линии передачи без потерь.***Перечислим основные результаты теории длинных линий без потерь:

1. Напряжение, ток и входное сопротивление являются периодическими функциями относительно продольной координаты с периодом λл / 2, т.е. для любого сечения линии *z* справедливы равенства:

*U*(*z*) =*U*(*z* + λл / 2);

*I*(*z*) =*I*(*z* + λл / 2);

*Z*вх(*z*) = *Z*вх(*z* + λл / 2). (27)

1. Режим стоячих волн в линии реализуется при реактивных нагрузках: холостой ход, короткое замыкание, емкость *С*,индуктивность *L*.

Режим бегущей волны реализуется при чисто активной нагрузке, равной волновому сопротивлению линии: *R*н = *W*, *Х*н = 0. Если сопротивление нагрузки *Z*н = *R*н + *jХ*н удовлетворяет данному условию, то говорят, что линия согласована с нагрузкой. Режим согласования имеет исключительно важное практическое значение, поскольку позволяет обеспечить:

* увеличение мощности, передаваемой в нагрузку;
* увеличение электрической прочности линии;
* увеличение КПД линии;
* устранение вредного влияния отраженной волны на генератор.

1. Режим смешанных волн реализуется при остальных нагрузках, кроме перечисленных в пп. 2 и 3.
2. В сечениях линии, в которых напряжение или ток достигают максимума или минимума, входное сопротивление линии чисто активное.
3. Отрезок линии можно рассматривать как трансформатор сопротивлений, при этом, учитывая (1.27), полуволновый отрезок линии имеет коэффициент трансформации, равный единице, а для произвольного сечения *z* линии справедливо соотношение:

*Z*вх(*z*)*Z*вх(*z* + λл / 4) = *W*. (28)

***Свойства линии с потерями.*** Найдем коэффициент распространения *γ* в линии при наличии тепловых потерь в проводниках и диэлектриках:

.

Принимая во внимание, что потери в реальной линии малы, а круговая частота ω велика, можно сделать вывод о малости величин и : , .

Разложив в последнем выражении функцию представленную квадратным корнем в степенной ряд относительно  и  и ограничившись первыми двумя членами в этих разложениях, получим:

*.*

Так как *γ*= α+ *j*β, из последнего соотношения найдем:

;  (29)

В практических случаях потери в диэлектрике могут быть малы по сравнению с потерями в металле, поэтому в (1.29) выражение для αможно упростить:

. (30)

***Коэффициент полезного действия линии.***Важным параметром линии с потерями является ее коэффициент полезного действия (КПД). Определим КПД как отношение мощности *Р*н, выделившейся в нагрузке, к мощности *Р*п, подведенной к входу линии:

*η = Pн / Рп.*  (31)

Примем длину отрезка линии равной *l*. Найдем КПД линии, работающей в режимах бегущей волны и смешанных волн. В первом случае, в соответствии с (6) выражения для напряжения и тока примут вид:

*U = AUeγz*, *I = АIeγz*. (32)

Мощность, выделяющуюся в нагрузке, найдем из соотношения

*P*н = . (33)

Здесь символ Re обозначает выделение действительной части из выражения, находящегося в квадратных скобках, а звездочка над буквой - операцию комплексного сопряжения.

Подставляя в выражение для *Р*н значения напряжения и тока из (32), получаем:

*Р*н*=АU А*\**I*.

Найдем мощность, подводимую к линии длиной *l*:

*P*н = . (34)

Откуда, с учетом (32), определим

*Р*п *=* *АU А*\**Ie*2*γl*.

Подставляя найденные значения *Р*ни *Р*пв (1.31), получаем:

η = *e*2*γl*. (35)

Когда потери малы, т.е. α*l* << 1, то последняя формула упрощается, если экспоненту представить в виде ряда по степеням аргумента -2α*l* и ограничиться в этом ряду первыми двумя членами: η ≈ 1 - 2α*l*.

В режиме смешанных волн будем использовать выражение для напряжения и тока в виде (6), которые с учетом (12) примут вид:

*U = AUeγz + BUe-γz = AU(eγz + Γ e-γz);*

*I =(1 / W) AUeγz + BUe-γz = (AU / W)(eγz + Γ e-γz).* (36)

Для определения КПД найдем *Р*ни *Р*п,используя (33) и (34):

*Pн =(АU А\*U / W)(1 - ⎜Γ⎜2); (37)*

*Pп =(АU А\*U / W)(1 - ⎜Γ⎜2е-4αl).*  (38)

Выражение для мощности, выделяющейся в нагрузке (37), имеет весьма показательный вид. Первое слагаемое в этом выражении представляет собой мощность падающей волны в месте подключения нагрузки (*z =* 0). Второе слагаемое есть мощность, уносимая назад к генератору отраженной волной в этом же сечении. Их разность определяет мощность, поступающую в нагрузку. Таким образом, выражение для КПД в режиме смешанных волн примет вид:

*η = Pн / Pп = (1 - ⎜Γ⎜2)е-2αl / (1 - ⎜Γ⎜2е-4αl).*  (39)

Зависимость КПД от α*l* проиллюстрирована графически на рис. 13:



Рис. 13. Зависимость КПД линии от значения потерь

при различной степени согласования

Из графиков следует, что если потери малы, то КПД слабо зависит от модуля коэффициента отражения. Если же потери значительны, то КПД существенно зависит от степени согласования линии с нагрузкой.

Следует отметить, что формула (39)получена в предположении, что генератор не согласован с линией, т.е. отраженная от нагрузки волна, достигая выхода генератора, полностью от него отражается и вновь направляется в нагрузку. Если же отраженная волна поглощается в генераторе, то

*η = (1 - ⎜Γ⎜2)е-2αl.*

***Пределы применимости теории регулярных линий передачи.***

Рассмотренная теория применима к симметричным и несимметричным линиям передачи, если выполняются следующие условия:

1. линии передачи регулярны;
2. линии выполнены так, что можно пренебречь их излучением;

3) основной волной в таких линиях является поперечная электромагнитная волна (волна типа *Т*).

В местах нарушения регулярности линии возникают волны высших типов, и анализ таких нерегулярностей следует проводить с применением методов прикладной электродинамики.

При наличии излучения электромагнитных волн, распространяющихся вдоль линии, необходим дополнительный учет потерь энергии на излучение. При этом эквивалентная схема участка линии длиной *dz* (см. рис. 2)оказывается неприемлемой.

Для того чтобы в линии основной волной была бы волна типа *Т,* порядок связности ее поперечного сечения должен быть больше единицы. При этом размеры поперечного сечения проводников такой линии следует выбирать из условия нахождения волн высших типов в закритическом режиме.

**2. Описание лабораторной установки**

Схема лабораторной установки представлена на рис. 14, на котором обозначено: 1 *–* генератор СВЧ колебаний, 2 *–* развязывающее устройство СВЧ (коаксиальный ферритовый вентиль), 3 *–* измерительная линия, построенная на основе полого коаксиального металлического волновода, 4 – полупроводниковый диодный детектор СВЧ колебаний (в составе измерительной линии), 5 *–* индикаторный прибор (цифровой вольтметр), 6 – нагрузка линии.

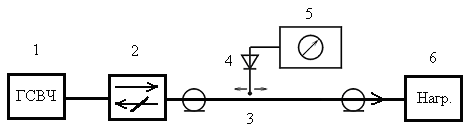


Рис. 14. Схема лабораторной установки

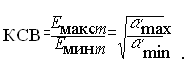
Основным элементом измерительной линии является отрезок коаксиального волновода 3 с узкой продольной щелью, не излучающей электромагнитные волны. Через щель внутрь волновода введен зонд, который связан с измерительной головкой, состоящей из перестраиваемого по частоте объемного резонатора и полупроводникового диодного детектора 4. Измерительная головка может перемещаться вдоль линии с возможностью измерения расстояния с помощью измерительной линейки, укрепленной на корпусе линии.

Электромагнитное поле линии наводит в зонде электродвижущую силу, пропорциональную напряженности электрического поля в месте расположения зонда. Эта электродвижущая сила возбуждает электромагнитные колебания в резонаторе, с которым связан диодный детектор. Выпрямленное напряжение с детектора подается на индикаторный прибор – цифровой вольтметр постоянного тока. Перемещая зонд измерительной линии вдоль продольной оси, можно определить значения *αmin* и *αmax* показаний индикаторного прибора, соответствующие напряженностям электрического поля в узлах и пучностях *Eмин m*и *Eмакс m*.  Как и для других видов линий передачи, в режиме стоячей волны амплитуда напряженности электрического поля вдоль оси коаксиального волновода измерительной линии изменяется по закону



Отсюда следует, что расстояние Λ между соседними узлами или пучностями напряжения в линии равно λл/2 – половине длины волны в линии на данной частоте.

При измерении КСВ в линии следует учитывать уровень мощности входных СВЧ колебаний и заранее определять, в каком режиме – линейном или квадратичном будет работать детектор (см. техническое описание и инструкцию по эксплуатации измерительной линии). Соответственно, при низких уровнях мощности (в среднем, не более 1 мВт) детектирование можно считать квадратичным и КСВ определять по формуле



где *αmax, αmin* – максимальное и минимальное напряжения постоянного тока, индицируемые цифровым вольтметром.

При линейном детектировании КСВ следует определять по формуле



**3. Лабораторные задания и методические указания по их выполнению**

1. Исследование режима короткого замыкания линии. Измерение длины волны СВЧ колебаний генератора.

Подключить к выходу измерительной линии короткозамыкатель из комплекта измерительной линии. Установить на генераторе частоту колебаний, заданную преподавателем, включить режим немодулированных колебаний. Установить заданный уровень мощности. Перемещая зонд вдоль линии, обнаружить одну из пучностей напряжения, наблюдая за показаниями цифрового вольтметра; подстроить резонаторную камеру детектора до получения максимального выпрямленного напряжения на индикаторе вольтметра. Установить зонд в ближайшее к короткозамыкателю положение, и, плавно перемещая его в сторону генератора, найти пучность и узел напряжения, записать их координаты, измерить напряжения на выходе детектора в пучности и узле напряжения и определить КСВ. Установить зонд в ближайшее к короткозамыкателю положение, и, плавно перемещая его в сторону генератора, найти два ближайших узла напряжения и измерить расстояние ** между ними с помощью измерительной линейки линии. Рассчитать длину Т-волны в линии как *л=2.*Сравнить полученное значение с длиной волны*=с/f* , рассчитанной по известной частоте *f*.

2. Исследование режима холостого хода.

Снять короткозамыкатель. Установить зонд в ближайшее к короткозамыкателю положение, и, плавно перемещая его в сторону генератора, найти пучность и узел напряжения, записать их координаты, измерить напряжения на выходе детектора в пучности и узле напряжения и определить КСВ. Сравнить координаты узлов и пучностей напряжения для данного режима и режима короткого замыкания, сделать выводы.

1. Исследование режима смешанных волн.

Подключить к выходу линии согласованную нагрузку из комплекта измерительной линии. Измерить КСВ и сделать вывод о свойствах нагрузки.

**4. Содержание отчета**

В отчете должны быть представлены:

Формулы для расчета длины волны в линии передачи, комплексного коэффициента отражения напряжения (определение и выражение через сопротивление нагрузки и волновое сопротивление линии передачи), КСВ, выражение, связывающее КСВ и модуль комплексного коэффициента отражения напряжения; схема лабораторной установки;  результаты измерений и выводы.

**5. Контрольные вопросы**

1. Дать определения длины волны и фазовой скорости волны в линии передачи.

2. Дать определение волнового сопротивления линии передачи с Т-волной.

3. Дать определения коэффициента отражения напряжения, коэффициента отражения мощности, КСВ.

4. Как устроена измерительная линия? Какие измерения можно выполнять с ее помощью?

5. Как с помощью измерительной линии измерить КСВ в фидерном тракте?

6. Охарактеризовать режимы работы линии передачи: режим бегущей волны, короткого замыкания, холостого хода, смешанных волн.

7. Сформулировать условие согласования линии передачи с нагрузкой. Каковы цели согласования линии с нагрузкой?