### Стоячие волны в передающих линиях

# Решение уравнений Максвелла для однородных передающих линий могут рассматриваться с точки зрения обычной теории передающих линий. Применение последней позволяет рассмотреть полную картину рассмотреть полную картину распространения волн в линии, получающуюся при образовании отраженных волн, возникающих из-за наличия различных препятствий (неоднородностей) в однородных передающих линиях. Полная совокупность волн состоит из волн, распространяющихся в обоих направлениях, причем относительная амплитуда и фаза их определяются характером неоднородности, т.е. величиной полного сопротивления в месте ее включения.

# Интерференция обеих распространяющихся волн приводит к образованию стоячих волн в линии. Величина и положение стоячей волны могут быть легко определены.

Решение основной проблемы теории передающих линий получающихся путем рассмотрения двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях. В последующих рассуждениях по соображениям удобства используются прямоугольные координаты, причем *x* и *y* представляют собой поперечные координаты в любой соответствующей системе. Будем полагать, что генератор создает колебания только одной частоты и возбуждает в передающей линии только один вид колебаний.

Пусть *V1* и *I1* представляют собой соответственно напряжение и ток волны, распространяющейся направо в координатной системе, а *V2* и *I2* – напряжение и ток другой волны, распространяющейся справа налево. Эти две совокупности бегущих волн могут быть записаны в следующем виде:

*Падающая (бегущая вперед)*

(1)



*отраженная (бегущая назад)*

(2)



При заданном изменении *z* эти совокупности имеют те же значения, если *t* изменится на величину , где - фазовая скорость волны, имеющая положительное значение для первой совокупности и отрицательное – для второй.



Так как напряжение и ток бегущей волны не являются независимыми величинами. Используя уравнение

,



получаем выражения для падающих волн

(3)



для отраженных волн

(4)



Напряжения и ток отраженной волны сдвинуты друг относительно друга на 1800, на что указывает отрицательный знак перед одним из членов выражения. Если направление распространения изменить на обратное, то при заданном направлении электрического поля должно измениться направление магнитного поля, связанного с током в линии.

Распределение напряжения и тока в передающей линии может быть определено при помощи подвижного зонда, который реагирует на общее поле, образующееся в результате суммирования двух бегущих волн. Полное напряжение и ток в любой точке передающей линии представляет собой сумму соответствующих величин, определяемых уравнениями (2) и (3). Отношение полного напряжения к полному току равно

. (5)



Фактор времени из этого выражения выпадает, так как он присутствует во всех членах выражения. Если передающая линия нагружена на полное сопротивление *ZL* в точке *z=l*, то *Z=ZL* и

. (6)



Решая это уравнение относительно, получаем



. (7)



Следовательно, в любой другой точке вдоль линии полное сопротивление *Z* равно

. (8)



Уравнение (8) определяет соотношение между полным сопротивлением, наблюдаемым в любой другой точке передающей линии. Это важное соотношение может быть использовано различным образом.

Предположим, что некоторая точка передающей линии рассматривается как место включения нагрузки. Это может быть действительная нагрузка (создаваемая, например, антенной или активным сопротивлением) или просто некоторое нарушение формы или размеров линии. В других случаях может возникнуть необходимость рассматривать какую-либо произвольную точку как *опорную* для решения некоторых проблем, несмотря даже на то, что в этой точке не будет никаких отличительных особенностей. Такое положение может иметь место при установлении связи между полным сопротивлением в рассматриваемой точке и наблюдаемыми при этом стоячими волнами в линии.

Имеется много способов, с помощью которых могут быть произведены соответствующие наблюдения. Простейшее и наиболее наглядное измерение заключается в определении интенсивности полей вдоль передающей линии. Вследствие отражений от нагрузки в линии возникают знакомые нам стоячие волны, максимальные и минимальные значения которых создаются за счет сложения и вычитания падающей и отраженной волн. Хотя не имеет никакого значения, какая физическая величина при этом измеряется, допустим, что действующий прибор позволяет осуществлять измерение относительной величины полного напряжения. Пусть максимальное напряжение, отмечаемое таким прибором, будет обозначено *Vмакс*, а минимальное – *Vмин*. Величина r определяется как коэффициент стоячей волны напряжения, часто обозначаемый как КСВН, из отношения:

. (9)



Отношение , определяемое уравнением (7), называется коэффициентом отражения Г. В общем случае этот коэффициент представляет собой комплексное число. Уравнение (10) может быть записано в следующей форме:



. (10)



Если Г отличается от нуля, то в линии возникают отражения, что отмечается по наблюдаемым стоячим волнам.

#### Уравнение (7) можно также представить в виде

, (11)



где *ϕ* - угол векторной величины, стоящей в абсолютных скобках. Абсолютная величина Г зависит только от отношения ; однако фаза этой величины зависит как от природы нагрузки, так и от расстояния до места включения нагрузки. Используя уравнение (11), можно записать уравнение (10) в следующей форме:



(12)



или

(13)



Эти два уравнения математически совершенно идентичны, однако они записаны в такой форме, чтобы подчеркнуть то обстоятельство, что *ZL* может быть как больше, так и меньше *Z0*. Весьма интересен случай, когда полное сопротивление нагрузки представляет собой чисто активное сопротивление. В этом случае абсолютные скобки могут быть опущены, в результате чего получаются выражения

(14)



(15)



Свойства стоячих волн.

# Допустим, что падающая волна напряжения имеет амплитуду, равную единице. Опуская для простоты множители, зависящие от времени, можно представить полное напряжение в следующей форме:



. (16)



первый член этого выражения имеет единичную амплитуду и фазовый угол . Второй член имеет амплитуду имеет амплитуду, равную Г, и фазовый угол противоположного знака. Оба эти члена могут быть изображены в виде векторов, показанных на рис. 1 если фазовый угол , оба вектора суммируются, создавая максимум напряжения. При напряжения вычитаются, создавая минимум напряжения. Соответствующее выражение для тока имеет вид



. (17)



так как перед вторым членом этого выражения стоит отрицательный знак, то максимум тока возникает в точке, соответствующей минимуму напряжения, и наоборот.

*βZ*

*-βZ*

## Г

1

Рис. 1. Векторная диаграмма, иллюстрирующая соотношение между отраженной и падающей волной

В точках минимума и максимума отношение напряжения к току представляет собой действительную величину, т.е. полное сопротивление чисто активно, что позволяет оценить его с помощью легко измеряемого коэффициента стоячей волны. Таким образом, если считать, что расположено в точке минимума напряжения, то все члены выражения (13) представляют собой действительные величины. Обозначив сопротивление, включенное в точке минимума напряжения , получаем



, (18)



а в точке максимума напряжения

. (19)



Очевидно, что любая точка, расположенная на однородной передающей линии, не обладает никакими специфическими свойствами. Естественно, что это относится и к точкам минимума и максимума напряжения. Однако последние точки очень легко обнаруживаются на линии и математические операции сильно упрощаются, если такие точки выбираются в качестве *опорных точек* для различных расчетов, которые могут встретиться при работе с линиями.

Подобным методом может быть определено полное сопротивление нагрузки, включенной на конце передающей линии. Для этого требуется знать коэффициент стоячей волны *r* и расстояние *d* между некоторым минимумом напряжения и нагрузкой. Из приведенных выше рассуждений известно, что в точке величина . Используя общее выражение, определяемое уравнением (8), и решая его относительно , находим



(20)



Это важное соотношение позволяет оценить неизвестное полное сопротивление при помощи данных, которые легко получаются из лабороторных измерений.

Измерение полного сопротивления сводится к измерению трех величин, входящих в уравнение (20). сначала определяется длина волны в передающей линии. Это производится либо путем измерения расстояния между двумя точками минимума напряжения при замкнутом накоротко конце линии, либо путем расчета по известным значениям частоты генератора и предельной длины волны распространяющегося в линии вида колебаний. На основании полученных данных рассчитывается значение . Экспериментальное определение величин *r* и *d* не представляет сложности.



Физическая интерпретация коэффициента *r* очень проста. Коэффициент стоячей волны является мерой активной компоненты нагрузки. Физический смысл величины *d* менее прост вследствие того, что она не представляет абсолютно определенной величины, поскольку *d* есть расстояние от некоторого минимума напряжения до некоторой произвольной точки, выбранной наблюдателем как место, в котором считается включенной нагрузка. На низких частотах редко возникают какие-либо сомнения относительно точки включения нагрузки. Однако на частотах сантиметрового диапазона определение точки включения нагрузки, т.е. опорной точки, часто оказывается совершенно произвольным. После того как опорная точка определена, даже если это определение носит произвольный характер, расстояние *d* приобретает определенный физический смысл. Оно по существу является фазовым множителем, который определяет трансформацию сопротивления в величину , включенную на расстоянии *d* от точки минимума напряжения.



Часто встречаются случаи, когда может оказаться полезным определение соотношения между и расстоянием *d,* на котором полное сопротивление превращается в чисто активное сопротивление. Это легко произвести для нескольких частных случаев. Рассмотрим первый случай, когда представляет собой чисто активное сопротивление. Тогда



(21)



преобразуя правую часть уравнения, получаем

(22)



левая часть уравнения представляет собой чисто активное сопротивление, поэтому мнимый член правой части должен быть равен нулю. Это возможно в трех следующих случаях.

1. ; в этом случае стоячих волн нет.



1. или и т.д.; откуда . Это означает, что при таком значении d сопротивление нагрузки меньше, чем .



1. или и т.д. откуда . Это означает, что сопротивление нагрузки больше, чем .



Таким образом, если полное сопротивление нагрузки представляет собой чисто активное сопротивление, то минимумы напряжения могут возникать или в точках или в точках в зависимости от того, будет ли меньше или больше ;в случае же на линии не будут совсем появляться минимумы напряжения.



Если полное сопротивление нагрузки представляет собой чистую индуктивность, то и положение узла напряжения может быть найдено следующим образом. Пусть ; тогда



(23)



Это выражение должно быть равно нулю, что может быть при



или



Этот случай отличается от предыдущего тем, что положение узла напряжения зависит от предыдущего тем, что положение узла напряжения зависит от отношения .



Если , то *d* приближается к значениям если , то *d* приближается к . В частном случае, когда , . Таким образом, если представляет собой чистую индуктивность, то узлы напряжения будут находиться в точках, лежащих между и , и и т.д. наоборот, если коэффициент стоячей волны равен бесконечности и узлы напряжения расположены между точками, указанными выше, то нагрузка представляет собой чистую индуктивность, величина которой может быть рассчитана из соотношения



если нагрузка представляет собой чисто емкостное сопротивление и , то



(24)



Это выражение равно нулю при



A

B

C

D

E

F

G

H

Фиг. 2. Стоячие волны при различных значениях нагрузки, включенной в точке d=0.

Случаи А и В соответствуют активной нагрузке. Остальные - чисто реактивным нагрузкам

Если , то и , а d стремится к значениям d=0, ,… если , то d стремится к значениям в частном случае, когда , величина Таким образом, если найдено, что коэффициент стоячей волны равен бесконечности, а значения *d* лежат в диапазоне от 0 до , от до и т.д., то нагрузка должна представлять собой чисто емкостное сопротивление, величина которого может быть рассчитана из выражения



Три случая, рассмотренные выше сведены в графики, приведенные на рис. 2 и 3. Второй из них не требует пояснения, второй показывает области, в которых будут находится минимумы напряжения для трех рассмотренных выше случаев нагрузки.



Рис. 3. Положение минимума напряжения по отношению к месту включения нагрузки при чисто активной и чисто реактивной нагрузках.



##### Список литературы

1. Э. Л. Гинзтон, «Измерения на сантиметровых волнах», изд. иностранной литературы, Москва, 1960г.