

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

Свободные электромагнитные волны.

Распространение в открытом пространстве колебаний векторов напряженности электрического и индукции магнитного поля называется свободной электромагнитной волной. Излучателем электромагнитных волн метрового диапазона длин волн является антенна, роль которой выполняется открытым колебательным контуром, называемым также вибратором или диполем. Для получения незатухающих колебаний к нему подключают генератор электромагнитных колебаний. Скорость v распространения свободных электромагнитных волн в изотропных средах определяется выражением:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}, \quad (1)$$

где ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные. В вакууме эта скорость равна $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Электромагнитные волны – поперечные, причем векторы напряженности электрического поля \mathbf{E} и индукции магнитного поля \mathbf{B} образуют с вектором скорости распространения волны \mathbf{v} правовинтовую систему координат (рис. 1). Изменение векторов \mathbf{E} и \mathbf{B} в любой фиксированной точке пространства происходит по гармоническому закону и синфазно.

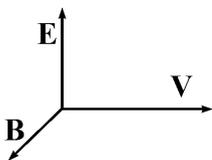


Рис. 1

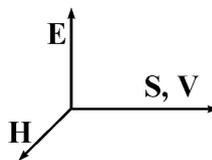


Рис. 2

Распространяющаяся электромагнитная волна переносит энергию, полученную от вибратора. Эту энергию принято характеризовать векторной величиной – вектором Умова-Пойнтинга \mathbf{S} , равной векторному произведению векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} : $\mathbf{S} = [\mathbf{E}, \mathbf{H}]$, где \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля (рис. 2). Численно она равна плотности потока энергии, то

есть энергии, которая переносится волной в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны. Направление вектора \mathbf{S} совпадает с направлением вектора \mathbf{v} .

Электромагнитные волны вдоль проводов. Бегущая волна.

Плотность потока энергии электромагнитных волн, распространяющихся во всех направлениях, убывает с увеличением расстояния от вибратора. Для уменьшения этих потерь применяют антенны, излучающие в определенном направлении. При передаче электромагнитной энергии на небольшие расстояния (от передатчика к антенне, от антенны к приемнику) используют фидерные линии. Простейшим видом фидерной линии является открытая двухпроводная линия, состоящая из двух параллельных металлических проводов.

В радиочастотном диапазоне электромагнитных волн применяются резонансные цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами. Элементы цепей с сосредоточенными параметрами (емкость и индуктивность) пространственно разграничены. Пространственная передача колебательного процесса при помощи проводников может быть осуществлена, если связать большое количество контуров, образуя цепочку, вдоль которой происходит распространение энергии. Безгранично увеличивая число таких контуров и уменьшая L и C каждого контура, мы придем в пределе к длинной линии, у которой поперечные размеры малы, а длина ее превосходит или сравнима с длиной волны. В линии каждый участок провода обладает емкостью, индуктивностью и активным сопротивлением, поэтому она называется цепью с распределенными параметрами. Электрические цепи с сосредоточенными параметрами обычно имеют малые размеры по сравнению с длиной волны. Напряжение и ток в них распространяются за промежутки времени, во много раз меньшие, чем период колебаний. Процессы в таких цепях рассматриваются только во времени. В линиях, имеющих длину такого же порядка, что и длина волны, время распространения уже сравнимо с периодом колебаний, поэтому процессы в линиях необходимо изучать не только во времени, но и в пространстве.

Если к началу бесконечной линии подключить источник переменной эдс (генератор), то ближайшие участки линии начнут заряжаться: между ними возникает напряжение, играющее роль эдс для последующего участка и т.д. Вдоль бесконечной линии от одного участка к другому проходит ток, создающий вдоль проводника магнитное поле. Таким образом, вдоль линии распространяется электромагнитное возмущение, или говорят, движется бегущая волна. Ток и напряжение совпадают по фазе в бегущей волне, поэтому колебания электрического и магнитного полей также совпадают по фазе. Распространение напряжения и тока происходит с конечной

скоростью v . Поэтому колебания векторов \mathbf{E} и \mathbf{B} в точке, расположенной на расстоянии x , будут запаздывать относительно колебаний в начале линии на время $\tau = x/v$:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \sin [\omega(t - x/v)], \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \sin [\omega(t - x/v)]. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) называются уравнениями волны. Для волны, распространяющейся в обратном направлении, получим:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \sin [\omega(t + x/v)], \quad (2a)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \sin [\omega(t + x/v)]. \quad (3b)$$

Итак, характерным отличием колебаний в длинной линии от колебаний в контуре является то, что в распространяющейся вдоль линии электромагнитной волне колебания электрического и магнитного полей происходят в одинаковых фазах. Графическое представление мгновенного распределения электрического и магнитного полей дано на рис. 3. Расстояние между точками, для которых колебания отличаются по фазе на 2π , называется длиной электромагнитной волны λ . Она равна расстоянию, на которое распространяется волна за время одного периода колебаний $\lambda = vT$. При распространении бегущей волны длинная линия поглощает всю энергию, отдаваемую ей генератором. Следовательно, такая линия представляет для генератора чисто активную нагрузку, подтверждая тот факт, что ток и напряжение в линии совпадают по фазе. Величина этой нагрузки называется волновым сопротивлением:

$$Z_0 = \sqrt{L_1/C_1}, \quad (4)$$

где L_1 и C_1 – индуктивность и емкость, приходящиеся на каждую единицу длины линии.

Скорость распространения бегущей волны вдоль линии, без учета потерь в линии, равна скорости распространения свободных электромагнитных волн. Так как сила тока и напряжение в бегущей волне меняются синфазно, очевидно, что в любом сечении линии отношение напряжения к силе тока будет величиной постоянной, равной волновому сопротивлению линии Z_0 . Следовательно, вся бесконечно длинная линия (или ее правая часть) по отношению к источнику (или ее левой части) эквивалентна сопротивлению, равному волновому.

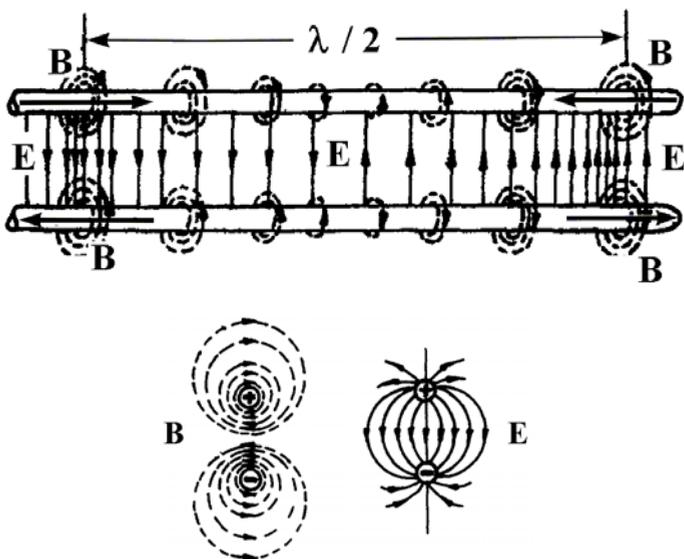


Рис. 3

Если разрезать бесконечно длинную линию и отбросить ее правую часть, то из оставшейся части получится линия конечной длины. Ее можно нагрузить на активное сопротивление R_n , равное волновому Z_0 . В такой линии по-прежнему будут существовать условия для режима бегущей волны. Следовательно, режим бегущей волны получается либо в очень длинных линиях, либо в укороченной линии, нагруженной на волновое сопротивление.

Двухпроводная линия конечной длины, разомкнутая на конце.

Так как в конце линии нет нагрузки, энергия бегущей волны не поглощается, но волна не может продолжать удаляться, потому что линия обрывается. Бегущая волна отражается от конца и движется обратно к генератору. В такой линии распространяются две волны: падающая и отраженная.

Примечание. Для источника постоянной эдс или эдс низкой частоты короткая линия, разомкнутая на конце, представляет собой бесконечно большое сопротивление. Для источника эдс высокой частоты сопротивление линии может иметь конечную и даже нулевую величину.

Пренебрегая потерями в линии, можно считать, что в случае согласованного генератора энергия отраженной волны равна энергии падающей волны. Если колебания электрического поля падающей волны в

начале линии задаются как: $E_1 = E_0 \sin \omega t$, то в точке, отстоящей на расстоянии x от начала, колебания будут иметь вид:

$$E_1 = E_0 \sin [\omega(t - x/v)], \quad (5)$$

или с учетом, что $\omega = 2\pi/T$ и $v = \lambda/T$:

$$E_1 = E_0 \sin (\omega t - 2\pi x/\lambda). \quad (6)$$

Уравнение колебания электрического поля в отраженной волне для той же точки имеет вид:

$$E_2 = E_0 \sin (\omega t + 2\pi x/\lambda - \varphi), \quad (7)$$

где φ – фазовый угол запаздывания колебаний напряженности электрического поля отраженной волны по сравнению с колебаниями первичной волны в точке $x = 0$.

Это запаздывание складывается из отставания по фазе $(2\pi/\lambda) \cdot 2l$, которое приобретает волна, дважды пройдя длину линии l , и возможного изменения фазового угла φ_0 при отражении от конца линии. Так как на конце линии возникают наибольшие колебания зарядов, то здесь будет находиться максимум электрического поля, что может произойти лишь в том случае, если электрическое поле при отражении не меняет фазы, то есть $\varphi_0 = 0$. Таким образом, $\varphi = (2\pi/\lambda) \cdot 2l$. При сложении обе волны дадут результирующее поле, напряженность которого равна:

$$E = E_1 + E_2 = E_0 \{ \sin [(\omega t - (2\pi/\lambda) \cdot x)] + E_0 \sin [\omega t - (2\pi/\lambda) \cdot x - (2\pi/\lambda) \cdot 2l] \}, \quad (8)$$

После тригонометрического преобразования выражение (8) приобретает вид:

$$E = 2 E_0 \cos (2\pi(l - x) / \lambda) \cdot \sin (\omega t - 2\pi l / \lambda). \quad (9)$$

Из полученного выражения, называемого уравнением стоячей волны, следует, что в линии будут происходить гармонические колебания с частотой первичной волны ω и начальной фазой $2\pi l/\lambda$, причем амплитуда этих колебаний $2 E_0 \cos [2\pi(l - x) / \lambda]$ зависит от координаты x и поэтому изменяется в различных точках линии. Точки, где амплитуда колебаний достигает максимума, называются пучностями электрического поля; точки, где амплитуда минимальна – узлами. Эти точки определяются из условий:

$$2\pi(l - x_n) / \lambda = 0, \pi, 2\pi, \dots, n\pi - \text{максимумы}, \quad (10)$$

$$2\pi(l - x_n) / \lambda = \pi/2, 3\pi/2, \dots, (2n+1)\pi/2 - \text{минимумы}. \quad (11)$$

Расстояние между двумя ближайшими пучностями или узлами равно:

$$\Delta x = x_n - x_{n-1} = \lambda/2. \quad (12)$$

Мгновенное распределение напряженности поля E (напряжения U) вдоль линии для цепочки последовательных моментов времени, отличающихся на одну шестнадцатую периода, показано на рис. 4.

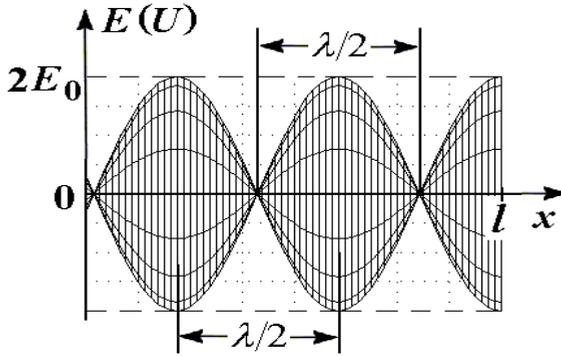


Рис. 4

Аналогичным образом можно найти распределение индукции магнитного поля B (электрического тока) вдоль линии. Амплитуда тока на конце линии равна нулю. Здесь будет узел тока, а значит, и узел магнитного поля. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы магнитное поле в отраженной волне изменяло свою фазу на π . С учетом этого обстоятельства уравнение стоячей волны для индукции магнитного поля имеет вид:

$$B = 2 B_0 \cos [2\pi x / \lambda - (2\pi l / \lambda + \pi/2)] \cdot \sin [\omega t - (2\pi l / \lambda + \pi/2)]. \quad (13)$$

Условия для пучностей и узлов индукции магнитного поля (силы тока):

$$2\pi(l - x_n) / \lambda = \pi/2, 3\pi/2, \dots, (2n+1)\pi/2 - \text{пучности}, \quad (14)$$

$$2\pi(l - x_n) / \lambda = 0, \pi, 2\pi, \dots, n\pi - \text{узлы}. \quad (15)$$

Условиями (7), (8), (10) и (11) утверждается экспериментальный факт того, что в стоячей электромагнитной волне узлы электрического поля (напряжения) совпадают с пучностями магнитного поля (тока) и наоборот. Это означает, что в стоячей волне между силой тока и напряжением всегда существует сдвиг фаз в 90° . Поэтому энергия в линии не расходуется, а происходит лишь ее колебание, то есть мы имеем дело с периодической пульсацией неподвижных волн, схожей с колебаниями в обычном контуре без потерь. Когда напряжение в линии максимально, то сила тока равна нулю, и энергия электрического поля максимальна, а энергия магнитного поля равна нулю и наоборот.

Входное сопротивление длинной линии при стоячей волне носит реактивный характер и в различных точках различно. При наличии только бегущей волны в любой ее точке оно одинаково и имеет активный характер.

Двухпроводная линия, короткозамкнутая на конце.

В короткозамкнутой линии, так же как и в разомкнутой линии, происходит отражение электромагнитной волны и образование стоячей волны. Отличие от предыдущего случая состоит в том, что на конце линии напряжение равно нулю; там находится узел напряжения (электрического поля) и пучность тока (магнитного поля), то есть распределение электрического и магнитного полей сдвинуто на четверть длины волны по сравнению с разомкнутой линией.

Описание установки.

В данной работе двухпроводная линия состоит из двух латунных стержней, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга и подключенных к УКВ (ультракоротковолновому) генератору. Длина линии подобрана так, что в ней может образоваться стоячая волна. В реальной двухпроводной линии практически не могут быть осуществлены режимы чисто бегущей или чисто стоячей волны из-за наличия потерь на джоулево тепло и на излучение. Однако можно подобрать такое сопротивление на конце линии, что будут преобладать бегущие волны, когда средние значения амплитуды напряжения и силы тока в линии почти не меняются.

Места пучностей напряженности электрического поля в линии определяют при помощи перемещаемого мостика, в состав которого входит индикаторная газоразрядная (неоновая) лампа, вспыхивающая в местах пучностей электрического напряжения (рис. 5а).

Электрическая цепь измерителя магнитной составляющей электромагнитного поля состоит из плоской катушки индуктивности с малым числом витков (датчика) К, детектора Д и микроамперметра

постоянного тока μA . Плоскость катушки ориентирована перпендикулярно направлению силовых линий индукции магнитного поля в промежутке между латунными стержнями, образующими длинную линию (рис. 5б). Индукционный ток, наводимый в катушке магнитным полем, будет пропорционален амплитуде тока в том сечении линии, около которого расположена катушка. В измерительной цепи включен кристаллический детектор с нелинейной (квадратичной) вольтамперной характеристикой. Поэтому показания микроамперметра пропорциональны квадрату амплитуды индукции магнитного поля, и, следовательно, квадрату амплитуды тока в двухпроводной линии.

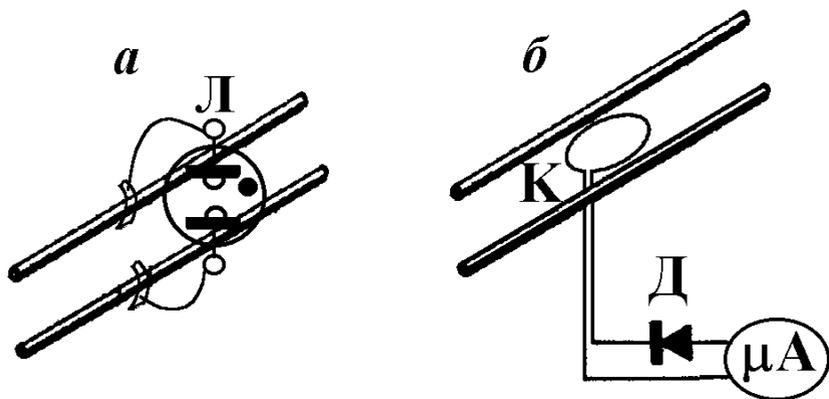


Рис. 5

Задание. Исследование двухпроводной линии в режиме бегущей и стоячей электромагнитной волны.

1. Включить УКВ генератор в сеть и дать ему прогреться 20 минут.
2. Перемещая индикаторную газоразрядную лампу вдоль разомкнутой на конце двухпроводной линии, измерить положения пучностей и узлов напряжения (напряженности электрического поля).
3. По формуле $\lambda = 2l/(n-1)$ вычислить длину волны, где l – расстояние между первой и n -й пучностями (или узлами).
4. По формуле $\nu = c / \lambda$ определить частоту генератора ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).
5. Перемещая индикатор индукции магнитного поля вдоль линии, снять зависимость силы тока через индикатор от расстояния: $I = f(x)$. Полученную зависимость изобразить графически. Определить по графику положения пучностей и узлов магнитного поля, сравнить их расположение

с расположением пучностей и узлов электрического поля (п. 2). Дать объяснение результатам сравнения.

6. По формуле $\lambda = 2l/(n-1)$ вычислить длину волны для результатов измерений п. 5 и сравнить ее с длиной волны, полученной в п. 3.

7. Прodelать задания, указанные в п.п. 2 – 6, с линией замкнутой на ее конце.

8. Нагрузить линию волновым сопротивлением $R_{\text{н}} = Z_0$ и при помощи индикаторов убедиться, что в линии преобладает бегущая волна.

Вопросы для подготовки.

1. Электромагнитная теория Максвелла (уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной форме, волновое уравнение, уравнения среды).
2. Свободные электромагнитные волны и их свойства. Плотность энергии и давление электромагнитного поля, вектор Умова-Пойнтинга.
3. Электрические цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами.
4. Особенности распространения бегущей волны в длинной линии, волновое сопротивление линии.
5. Стоячие электромагнитные волны в линии, замкнутой и разомкнутой на конце.
6. Генерирование электромагнитных колебаний. Схема простейшего LC-генератора.