

# Длинная линия

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

## Содержание

- [1 Дифференциальные уравнения длинной линии](#)
  - [1.1 Погонные параметры](#)
  - [1.2 Эквивалентная схема участка длинной линии](#)
  - [1.3 Телеграфные уравнения](#)
  - [1.4 Условие регулярности линии](#)
  - [1.5 Однородные волновые уравнения длинной линии](#)
  - [1.6 Распределение поля падающей волны](#)
- [2 Комплексный коэффициент отражения по напряжению](#)
- [3 Коэффициенты бегущей и стоячей волны](#)
- [4 Входное сопротивление длинной линии](#)
- [5 Режимы работы длинной линии](#)
  - [5.1 Режим бегущей волны](#)
  - [5.2 Режим стоячей волны](#)
  - [5.3 Режим смешанных волн](#)
- [6 Линия без потерь](#)
  - [6.1 Разомкнутая линия](#)
  - [6.2 Замкнутая линия](#)
  - [6.3 Ёмкостная нагрузка](#)
  - [6.4 Индуктивная нагрузка](#)
  - [6.5 Активная нагрузка](#)
  - [6.6 Комплексная нагрузка](#)
- [7 КПД линии с потерями](#)
- [8 Пределы применимости теории длинной линии](#)
- [9 См. также](#)
- [10 Примечания](#)

**Длинная линия** — регулярная линия передачи <sup>[1]</sup>, длина которой превышает длину волны ( $\lambda$ ) колебаний, распространяющихся в линии.

Характерной особенностью длинных линий является проявление [интерференции](#) двух волн, распространяющихся навстречу друг другу. Одна из этих волн создается генератором электромагнитных колебаний, подключенным к линии, и называется **падающей**. Другая волна может возникать из-за отражения падающей волны от нагрузки, подключенной к противоположному концу линии, и называется **отраженной**. Отраженная волна 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 рисунке 1. На рисунке обозначено:  $Z_H = R_H + iX_H$  — комплексное сопротивление нагрузки;  $z$  — продольная координата линии, отсчитываемая от места подключения нагрузки.

## Погонные параметры

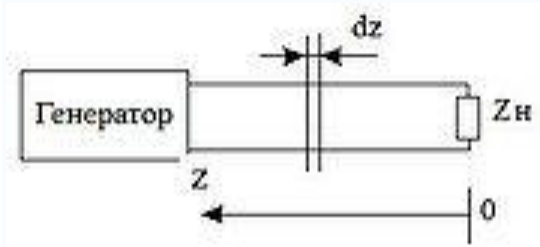


Рис.1 — К выводу дифференциальных уравнений длинной линии

Из электродинамики известно, что линия передачи может быть охарактеризована ее **погонными параметрами**:

- $R_1$  — погонное сопротивление, Ом/м;
- $G_1$  — погонная проводимость, 1/Ом м;
- $L_1$  — погонная индуктивность Гн/м;
- $C_1$  — погонная ёмкость Ф/м;

Погонные сопротивление  $R_1$  и проводимость  $G_1$  зависят от проводимости материала проводов и качества диэлектрика, окружающего эти провода, соответственно. Чем меньше тепловые потери в металле проводов<sup>[2]</sup> и в диэлектрике, тем меньше соответственно,  $R_1$ <sup>[3]</sup> и  $G_1$ <sup>[4]</sup>. Погонные индуктивность  $L_1$  и емкость  $C_1$  определяются формой и размерами поперечного сечения проводов, а также расстоянием между ними.

## Эквивалентная схема участка длинной линии

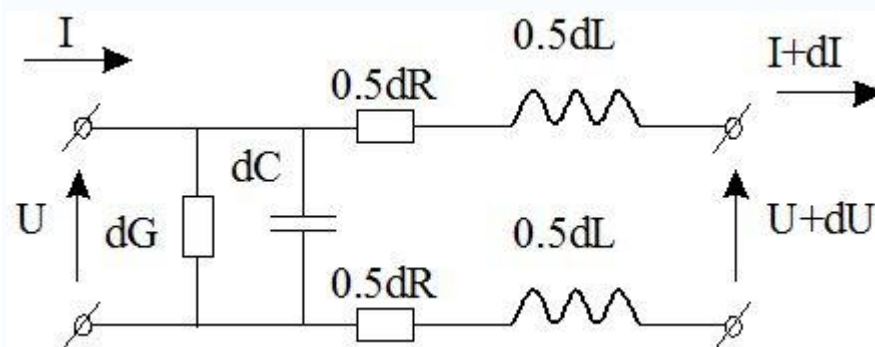


Рис.2 — Эквивалентная схема участка длинной линии

Выделим из линии элементарный участок бесконечно малой длины  $dz$  и рассмотрим его эквивалентную схему, показанную на рисунке 2. 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:

$$\begin{cases} dR = R_1 dz; \\ dG = G_1 dz; \\ dL = L_1 dz; \\ dC = C_1 dz; \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\begin{cases} dU = I(dR + i\omega dL) \\ dI = U(dG + i\omega dC) \end{cases}$$

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

$$\begin{cases} dU = IZ_1 dz \\ dI = UY_1 dz \end{cases},$$

где  $Z_1 = R_1 + i\omega L_1$ ,  $Y_1 = G_1 + i\omega C_1$  — погонные комплексные сопротивление и проводимость линии. Из последних соотношений находим **дифференциальные уравнения линии**:

### Телеграфные уравнения

$$\begin{cases} \frac{dU}{dz} = IZ_1 \\ \frac{dI}{dz} = UY_1 \end{cases} \quad (2)$$

Эти соотношения называются **телеграфными уравнениями** длинной линии. Они определяют связь между током и напряжением в любом сечении линии. Решим телеграфные уравнения относительно напряжения и тока. Для этого продифференцируем их по  $z$ :

$$\begin{cases} \frac{d^2 U}{dz^2} = \frac{dI}{dz} Z_1 \\ \frac{d^2 I}{dz^2} = \frac{dU}{dz} Y_1 \end{cases} \quad (3)$$

При этом учтем, что:

### Условие регулярности линии

$$\begin{cases} \frac{dZ_1}{dz} = 0 \\ \frac{dY_1}{dz} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Данные соотношения являются математическим определением регулярности длинной линии. Смысл соотношения (4) состоит в неизменности вдоль линии ее погонных параметров.

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

### Однородные волновые уравнения длинной линии

$$\begin{cases} \frac{d^2 U}{dz^2} - \gamma^2 U = 0 \\ \frac{d^2 I}{dz^2} - \gamma^2 I = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $\gamma$  — коэффициент распространения волны в линии:  $\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1}$ .

Соотношения (5) называются **однородными волновыми уравнениями** длинной линии. Их решения известны и могут быть записаны в виде:

$$\begin{cases} U = A_U e^{\gamma z} + B_U e^{-\gamma z} \\ I = A_I e^{\gamma z} + B_I e^{-\gamma z} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $A_U, B_U$  и  $A_I, B_I$  — коэффициенты, имеющие единицы измерения напряжения и тока соответственно, смысл которых будет ясен ниже.

Решения волновых уравнений в виде (3.6) имеют весьма характерный вид: первое слагаемое в этих решениях представляет собой *падающую* волну напряжения или тока, распространяющуюся от генератора к нагрузке, второе слагаемое — *отраженную* волну, распространяющуюся от нагрузки к генератору. Таким образом, коэффициенты  $A_U, A_I$  представляют собой комплексные амплитуды падающих волн напряжения и тока соответственно, а коэффициенты  $B_U, B_I$  — комплексные амплитуды отраженных волн напряжения и тока соответственно. Так как часть мощности, передаваемой по линии, может поглощаться в нагрузке, то амплитуды отраженных волн не должны превышать амплитуды падающих:

$$\begin{cases} |B_U| \leq |A_U| \\ |B_I| \leq |A_I| \end{cases}$$

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. 1). Так, например, для падающих волн напряжения и тока можно записать:

$$\begin{cases} U_{\Pi} = A_U e^{\gamma z} \\ I_{\Pi} = A_I e^{\gamma z} \end{cases}, \quad (7)$$

Коэффициент распространения волны в линии  $\gamma$  в общем случае является комплексной величиной и может быть представлен в виде:

$$\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + i\omega L_1)(G_1 + i\omega C_1)} = \alpha + i\beta, \quad (8)$$

где  $\alpha$  — коэффициент затухания волны [5] в линии;  $\beta$  — коэффициент фазы [6]. Тогда соотношение (7) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} U_{\Pi} = A_U e^{\alpha z} e^{i\beta z} \\ I_{\Pi} = A_I e^{\alpha z} e^{i\beta z} \end{cases} \quad (9)$$

Так как при распространении падающей волны на длину волны в линии  $\lambda_L$  фаза волны изменяется на  $2\pi$ , то коэффициент фазы можно связать с длиной волны  $\lambda_L$  соотношением

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_L}. \quad (10)$$

При этом фазовая скорость волны в линии  $V_{\Phi}$  определяется через коэффициент фазы:

$$V_{\Phi} = \frac{\omega}{\beta}. \quad (11)$$

Определим коэффициенты  $A$  и  $B$ , входящие в решения (6) волновых уравнений, через значения напряжения  $U_H$  и тока  $I_H$  на нагрузке. Это является оправданным, так как напряжение и ток на нагрузке практически всегда можно измерить с помощью измерительных приборов. Воспользуемся первым из телеграфных уравнений (2) и подставим в него напряжение и ток из (6). Тогда получим:

$$A_U \gamma e^{\gamma z} - B_U e^{-\gamma z} = A_I \gamma e^{\gamma z} - B_I e^{-\gamma z}$$

Сравнив коэффициенты при экспонентах с одинаковыми показателями степеней, получим:

$$\begin{cases} A_I = \frac{A_U}{W} \\ B_I = -\frac{B_U}{W}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $W = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}}$  — волновое сопротивление линии [7].

Перепишем (6) с учетом (12):

$$\begin{cases} U = A_U e^{\gamma z} + B_U e^{-\gamma z} \\ I = \frac{A_U e^{\gamma z} - B_U e^{-\gamma z}}{W} \end{cases} \quad (13)$$

Для определения коэффициентов  $A$  и  $B$  в этих уравнениях воспользуемся условиями в конце линии  $z = 0$ :

$$\begin{cases} U(z = 0) = U_H \\ I(z = 0) = I_H \end{cases}$$

Тогда из (13) при  $z = 0$  найдем

$$\begin{cases} A_U = \frac{1}{2}(U_H + I_H W) \\ B_U = \frac{1}{2}(U_H - I_H W) \end{cases}, \quad (14)$$

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

$$\begin{cases} U = U_H \operatorname{ch}(\gamma z) + I_H W \operatorname{sh}(\gamma z) \\ I = I_H \operatorname{ch}(\gamma z) + \frac{U_H}{W} \operatorname{sh}(\gamma z) \end{cases} \quad (15)$$

При выводе (15) учтены определения гиперболических синуса и косинуса<sup>[8]</sup>.

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 на нагрузке.

Рассмотрим простейший случай, когда напряжение и ток в линии определяются только падающей волной, а отраженная волна отсутствует<sup>[9]</sup>. Тогда в (6) следует положить  $B_U = 0, B_I = 0$ :

$$\begin{cases} U = A_U e^{\alpha z} e^{i\beta z} \\ I = A_I e^{\alpha z} e^{i\beta z} \end{cases}$$

## Распределение поля падающей волны

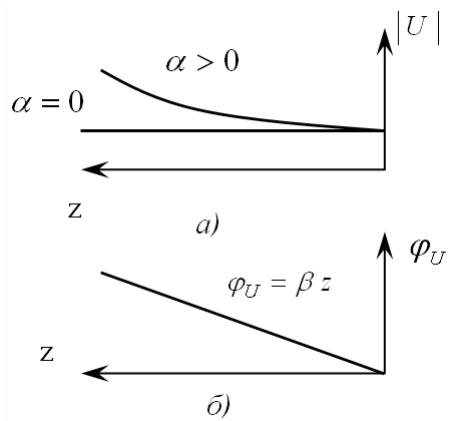


Рис.3. Эпюры напряжений падающей волны в длинной линии. а) амплитуда; б) фаза

На рис.3. представлены эпюры изменения амплитуды  $|U|$  и фазы  $\varphi_U$  апряжения вдоль линии. Эпюры изменения амплитуды и фазы тока имеют такой же вид. Из рассмотрения эпюр следует, что при отсутствии в линии потерь ( $\alpha^{[51]} = 0$ ) амплитуда напряжения в любом сечении линии остается одной и той же. При наличии потерь в линии ( $\alpha^{[51]} > 0$ ) часть переносимой мощности преобразуется в тепло (нагревание проводов линии и окружающего их диэлектрика). По этой причине амплитуда напряжения падающей волны экспоненциально убывает в направлении распространения.

Фаза напряжения падающей волны  $\varphi_U = \beta z$  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, то есть  $\alpha^{[51]} = 0$ . Тогда напряжение в линии можно представить в виде:

$$U = A_U e^{i\beta z} + B_U e^{-i\beta z} = A_U (e^{i\beta z} + \Gamma e^{-i\beta z}) \quad (16)$$

где  $\Gamma = B_U / A_U$  — комплексный коэффициент отражения по напряжению.

## Комплексный коэффициент отражения по напряжению

Характеризует степень согласования линии передачи с нагрузкой. Модуль коэффициента отражения изменяется в пределах:  $0 \leq |\Gamma| \leq 1$

- $|\Gamma| = 0$ , если отражения от нагрузки отсутствуют и  $B_U = 0^{[9]}$ ;
- $|\Gamma| = 1$ , если волна полностью отражается от нагрузки, то есть  $|A_U| = |B_U|$ ;

Соотношение (16) представляет собой сумму падающей и отраженной волн.

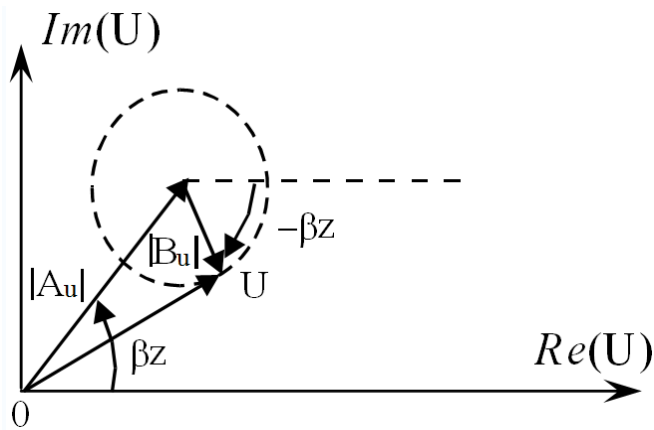


Рис.4. Векторная диаграмма напряжений в линии с отраженной волной

Отобразим напряжение на комплексной плоскости в виде векторной диаграммы, каждый из векторов которой определяет падающую, отраженную волны и результирующее напряжение (рис. 4). Из диаграммы видно, что существуют такие поперечные сечения линии, в которых падающая и отраженная волны складываются в фазе. Напряжение в этих сечениях достигает максимума, величина которого равна сумме амплитуд падающей и отраженной волн:

$$U_{max} = |A_U| + |B_U|.$$

Кроме того, существуют такие поперечные сечения линии, в которых падающая и отраженная волны складываются в противофазе. При этом напряжение достигает минимума:

$$U_{min} = |A_U| - |B_U|.$$

Если линия нагружена на сопротивление, для которого  $|\Gamma| = 1$ , т.е. амплитуда падающей и отраженной волн равны  $|B_U| = |A_U|$ , то в этом случае  $U_{max} = 2|A_U|$ , а  $U_{min} = 0$ .

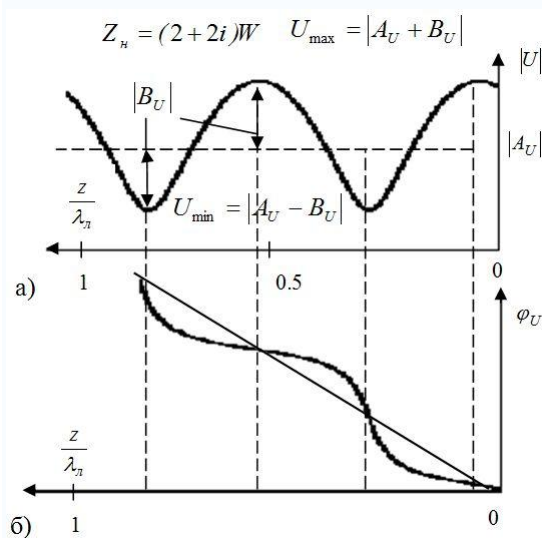


Рис.5. Эпюры распределения напряжения вдоль линии с отражённой волной. а) Модуль напряжения; б) фаза напряжения.



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.

## Коэффициенты бегущей и стоячей волны

По эпюре напряжения судят о степени согласования линии с нагрузкой. Для этого вводятся понятия коэффициента бегущей волны -  $k_{БВ}$  и коэффициента стоячей волны  $k_{СВ}$ :

$$k_{bv} = \frac{U_{min}}{U_{max}} = \frac{|A_U| - |B_U|}{|A_U| + |B_U|} = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|} \quad (17)$$

$$k_{sv} = \frac{1}{k_{bv}} \quad (18)$$

Эти коэффициенты, судя по определению, изменяются в пределах:

$$0 \leq k_{bv} \leq 1 \quad 0 \leq k_{sv} \leq \infty$$

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

## Входное сопротивление длинной линии

Входное сопротивление линии — является важной характеристикой, которое определяется в каждом сечении линии как отношение напряжения к току в этом сечении:

$$\begin{aligned} Z_{BX} &= R_{BX} + iX_{BX} \\ Z_{BX}(z) &= \frac{U(z)}{I(z)} \end{aligned} \quad (19)$$

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

Различают три режима работы линии:

1. режим бегущей волны; [\[10\]](#)
2. режим стоячей волны; [\[10\]](#)
3. режим смешанных волн.

## Режим бегущей волны

Режим бегущей волны характеризуется наличием только падающей волны, распространяющейся от генератора к нагрузке. Отраженная волна отсутствует. Мощность, переносимая падающей волной, полностью выделяется в нагрузку. В этом режиме  $\mathbf{V}_U = 0$ ,  $|\Gamma| = 0$ ,  $k_{\text{бв}} = k_{\text{св}} = 1$  [10].

## Режим стоячей волны

Режим стоячей волны характеризуется тем, что амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей  $\mathbf{V}_U = \mathbf{A}_U$  т.е. энергия падающей волны полностью отражается от нагрузки и возвращается обратно в генератор. В этом режиме,  $|\Gamma| = 1$ ,  $k_{\text{св}} = \infty$ ,  $k_{\text{бв}} = 0$  [10].

## Режим смешанных волн

В режиме смешанных волн амплитуда отраженной волны удовлетворяет условию  $0 < \mathbf{V}_U < \mathbf{A}_U$  т.е. часть мощности падающей волны теряется в нагрузке, а оставшаяся часть в виде отраженной волны возвращается обратно в генератор. При этом  $0 < |\Gamma| < 1$ ,  $1 < k_{\text{св}} < \infty$ ,  $0 < k_{\text{бв}} < 1$

## Линия без потерь

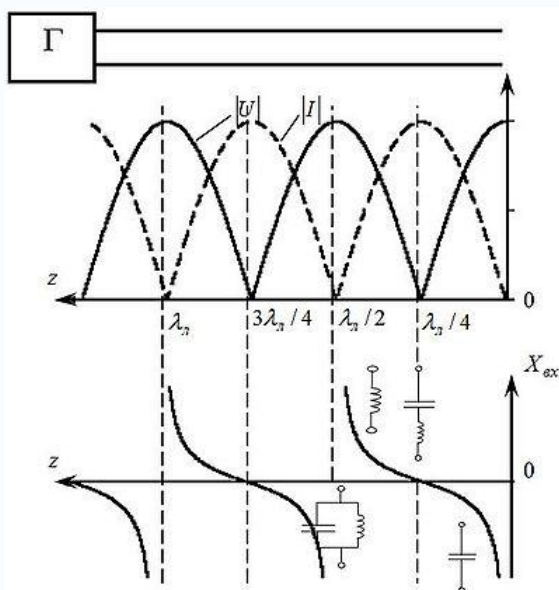


Рис.6. Эпюры напряжения, тока и входного сопротивления в короткозамкнутой линии

В линии без потерь погонные параметры  $R_1 = 0$  и  $G_1 = 0$ . Поэтому для коэффициента распространения  $\gamma$  и волнового сопротивления  $W$  получим:

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + i\omega L_1)(G_1 + i\omega C_1)} = i\omega \sqrt{L_1 C_1} \\ &; \\ \alpha &= 0; \quad \beta = \omega \sqrt{L_1 C_1}; \quad W = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}. \end{aligned} \quad (20)$$

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

$$\begin{aligned} U &= U_H \cos(\beta z) + i I_H W \sin(\beta z) \\ I &= I_H \sin(\beta z) + i \frac{U_H}{W} \cos(\beta z) \end{aligned} \quad (21)$$

При выводе этих соотношений учтены особенности <sup>[11]</sup> гиперболических функций <sup>[8]</sup>.

Рассмотрим конкретные примеры работы линии без потерь на простейшие нагрузки.

### Разомкнутая линия

В этом случае ток, протекающий через нагрузку равен нулю ( $I_H = 0$ ), поэтому выражения для напряжения, тока и входного сопротивления в линии принимают вид:

$$\begin{aligned} U &= U_H \cos(\beta z); \quad I = i \frac{U_H}{W} \sin(\beta z) \\ Z_{BX} &= \frac{U}{I} = -i W \operatorname{ctg}(\beta z) = i X_{BX} \quad (22) \\ \beta &= \frac{2\pi}{\lambda} \end{aligned}$$

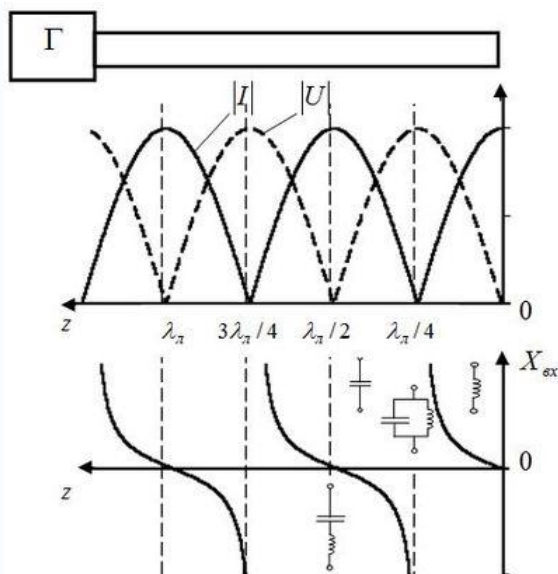


Рис.7. Эпюры напряжений, тока и входного сопротивления в короткозамкнутой линии

На рис.6 эти зависимости проиллюстрированы графически. Из соотношений (22) и графиков следует:

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

- линия, длина которой лежит в интервале от  $\lambda_{\text{л}}/4$  до  $\lambda_{\text{л}}/2$ , эквивалентна индуктивности;
- разомкнутая на конце линия длиной  $\lambda_{\text{л}}/2$  эквивалентна последовательному резонансному контуру на рассматриваемой частоте и имеет бесконечно большое входное сопротивление.

### Замкнутая линия

В этом случае напряжение на нагрузке равно нулю ( $U_{\text{н}} = 0$ ), поэтому напряжение, ток и входное сопротивление в линии принимают вид:

$$\begin{aligned} U &= iI_{\text{н}}W \sin(\beta z); & I &= I_{\text{н}} \cos(\beta z) \\ Z_{\text{вх}} &= \frac{U}{I} = iW \operatorname{tg}(\beta z) = iX_{\text{вх}} \end{aligned} \quad (23)$$

На рис.7 эти зависимости проиллюстрированы графически.

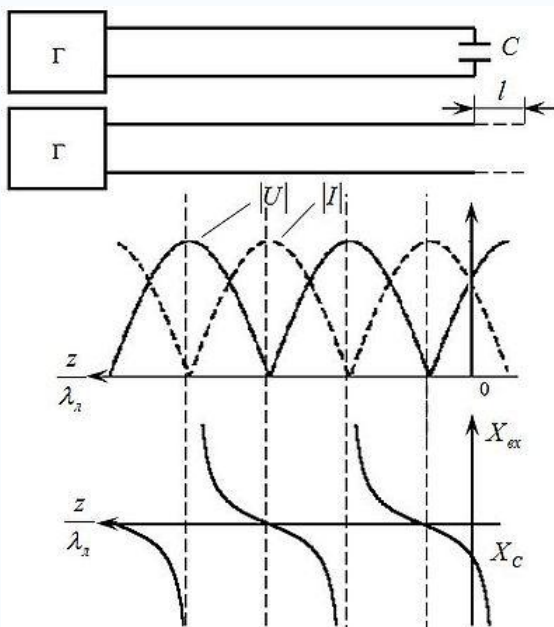


Рис.8. Эпюры напряжения, тока и входного сопротивления в линии, нагруженной на ёмкость

Используя результаты предыдущего раздела, нетрудно самостоятельно сделать выводы о трансформирующих свойствах короткозамкнутой линии. Отметим лишь, что в замкнутой линии также устанавливается режим стоячей волны. Отрезок короткозамкнутой линии, длиной меньше  $\lambda_{\text{л}}/4$  имеет индуктивный характер входного сопротивления, а при длине  $\lambda_{\text{л}}/4$  такая линия имеет бесконечно большое входное сопротивление на рабочей частоте <sup>[12]</sup>.

### Ёмкостная нагрузка

Как следует из анализа работы разомкнутой линии, каждой емкости  $C$  на данной частоте  $\omega$  можно поставить в соответствие отрезок разомкнутой линии длиной меньше  $\lambda_{\text{л}}/4$ . Емкость  $C$  имеет емкостное сопротивление  $iX_C = -\frac{i}{\omega C}$ . Приравняем величину этого сопротивления к входному сопротивлению разомкнутой линии длиной  $l < \lambda_{\text{л}}/4$ :

$$-\frac{i}{\omega C} = -iW \operatorname{ctg}(\beta l).$$

Отсюда находим длину линии, эквивалентную по входному сопротивлению емкости  $C$ :

$$l = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg}(\omega CW).$$

Зная эпюры напряжения, тока и входного сопротивления разомкнутой линии, восстанавливаем их для линии, работающей на емкость (рис.8). Из эпюр следует, что в линии, работающей на емкость, 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.

### Индуктивная нагрузка

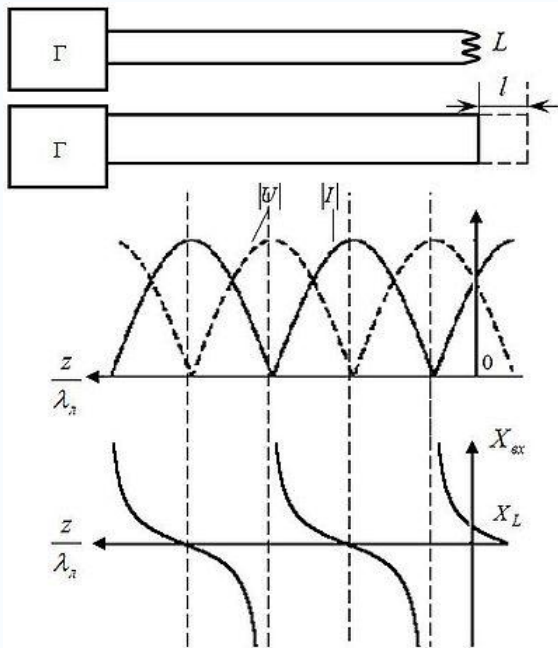


Рис.9. Эпюры напряжения, тока и входного сопротивления в линии, работающей на индуктивность

Как следует из анализа работы замкнутой линии, каждой индуктивности  $L$  на данной частоте  $\omega$  можно поставить в соответствие отрезок замкнутой линии длиной меньше  $\lambda_{\text{Л}}/4$ . Индуктивность  $L$  имеет индуктивное сопротивление  $iX_{\text{Л}} = i\omega L$ . Приравняем это сопротивление к входному сопротивлению замкнутой линии длиной  $\lambda_{\text{Л}}/4$ :

$$i\omega L = iW \operatorname{tg}(\beta l).$$

Отсюда находим длину линии  $l$ , эквивалентную по входному сопротивлению индуктивности  $L$ :

$$l = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg}\left(\omega \frac{L}{W}\right).$$

Зная эпюры напряжения, тока и входного сопротивления замкнутой на конце линии, восстанавливаем их для линии, работающей на индуктивность (рис. 9). Из эпюр следует, что в линии, работающей на индуктивность, также 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.

### Активная нагрузка

В этом случае ток и напряжение на нагрузке  $R_H$  связаны соотношением  $U_H = I_H R_H$ <sup>[13]</sup>. Выражения для напряжения и тока в линии (21) принимают вид:

$$\begin{aligned} U &= U_H \cos(\beta z) + i U_H \frac{W}{R_H} \sin(\beta z) \\ I &= I_H \cos(\beta z) + i I_H \frac{R_H}{W} \sin(\beta z) \end{aligned} \quad (23)$$

Рассмотрим работу такой линии на примере анализа напряжения. Найдем из (23) амплитуду напряжения в линии:

$$|U| = U_H \sqrt{\cos^2(\beta z) + \left(\frac{W}{R_H}\right)^2 \sin^2(\beta z)} \quad (24)$$

Отсюда следует, что можно выделить три случая:

- Сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии  $R_H = W$ <sup>[9][10]</sup>
- Сопротивление нагрузки больше волнового сопротивления линии  $R_H > W$
- Сопротивление нагрузки меньше волнового сопротивления линии  $R_H < W$

В первом случае из (24) следует  $|U| = U_H$ , то есть распределение амплитуды напряжения вдоль линии остается постоянным, равным амплитуде напряжения на нагрузке. Это соответствует режиму бегущей волны в линии.

### См. также

- [Регулярная линия передачи](#)
- [Измерительная линия](#)
- [Металлический изолятор](#)

### Примечания

1. [↑](#) Линия передачи, электрофизические и геометрические параметры которой не зависят от продольной координаты.
2. [↑](#) [Закон Джоуля — Ленца](#)
3. [↑](#) При уменьшении активных потерь на сопротивлении проводника в модели должно уменьшаться погонное сопротивление линии  $R_1$ .

4. ↑ Уменьшение активных потерь в диэлектрике означает увеличение его сопротивления, так как активные потери в диэлектрике — это токи утечки. Для модели используется обратная величина — погонная проводимость  $G_1$ .
5. ↑ [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) Коэффициент затухания  $\alpha$  определяет скорость уменьшения амплитуды волны при распространении вдоль линии.
6. ↑ Коэффициент фазы  $\beta$  определяет скорость изменения фазы волны вдоль линии.
7. ↑ [Волновым сопротивлением](#) линии передачи называется отношение напряжения к току в бегущей волне.
8. ↑ [1](#) [2](#) [Гиперболические функции](#)
9. ↑ [1](#) [2](#) [3](#) Такая линия называется полностью согласованной.
10. ↑ [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [5](#) Не реализуемо на практике. Является лишь математической абстракцией. Возможно лишь приближение в той, или иной степени.
11. ↑  $\operatorname{ch}(i\beta z) = \cos(\beta z)$ ,  $\operatorname{sh}(i\beta z) = \sin(\beta z)$
12. ↑ Это свойство короткозамкнутого четвертьволнового отрезка линии позволяет использовать его в практических устройствах как «[металлический изолятор](#)».
13. ↑ [Закон Ома](#)

Источник

«[http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%8F](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%8F)»

Категория: [СВЧ](#)