

МЭИ	ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 13	Утверждаю:
	Кафедра ВМСС	Зав. кафедрой
	<u>Дисциплина МСПИ</u> II часть	I
	Институт ИВТ	09.01.22 г.

1. Распределения напряжений и токов в длинной линии без потерь в зависимости от нагрузок на концах линии. Согласование длинных линий.

2. Особенности моделей длинных линий односвязных структур линий передачи.

1. Распределения напряжений и токов в длинной линии без потерь в зависимости от нагрузок на концах линии. Согласование длинных линий.

Распределение напряжения и тока в длинной линии без потерь рассматривается в зависимости от соотношения $\underline{k} = \frac{Z_B}{Z_H}$ (представление сопротивления нагрузки в относительных единицах). Подставив это соотношение в уравнения с тригонометрическими функциями для длинной линии без потерь, можно получить зависимость в общем виде:

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_2 \cos \beta x + j Z_B \underline{I}_2 \sin \beta x = \underline{U}_2 \cos \beta x + j \frac{Z_B}{Z_H} \underline{Z}_H \underline{I}_2 \sin \beta x = \underline{U}_2 \cos \beta x + j \underline{k} \underline{U}_2 \sin \beta x = \underline{U}_2 \cos \beta x + \underline{k} \underline{U}_2 \cos \beta x - \underline{k} \underline{U}_2 \cos \beta x - j \underline{k} \underline{U}_2 \sin \beta x = \underline{U}_2 [\underline{k} e^{j\beta x} + (1 - \underline{k}) \cos \beta x];$$

Аналогично выводится уравнение для тока: $\underline{I}(x) = \frac{\underline{U}_2}{Z_B} [\underline{k} e^{j\beta x} + j(1 - \underline{k}) \sin \beta x].$

Напряжение и ток в каждом сечении линии формируются из двух составляющих: бегущая волна (составляющая с множителем $e^{j\beta x}$) и стоячая волна (составляющая с множителем $\cos \beta x$ или $\sin \beta x$).

В случае *активной нагрузки* (совокупность бегущей и стоячей волны), при

$\underline{Z}_H = Z_H$, $\underline{k} = \frac{Z_B}{Z_H}$ уравнения принимают вид:

$$\underline{U}(x) = \frac{U_2}{Z_B} [k e^{j\beta x} + (1 - k) \cos \beta x];$$

$$\underline{I}(x) = \frac{U_2}{Z_B} [k e^{j\beta x} + j(1 - k) \sin \beta x].$$

Модули действующих значений тока и напряжения получаются при выделении модуля из уравнений в общем виде – корень из суммы квадратов действительной и мнимой части. Тогда для активной нагрузки (коэффициент \underline{k} – содержит только действительную часть k) справедливо:

$$U(x) = U_2 \sqrt{\cos^2 \beta x + k^2 \sin^2 \beta x};$$

$$I(x) = \frac{U_2}{Z_B} \sqrt{\sin^2 \beta x + k^2 \cos^2 \beta x}.$$

Согласованная нагрузка: $\underline{Z}_H = Z_B$, $k = 1$ (только бегущие волны).

$$\underline{U}(x) = \frac{U_2}{Z_B} e^{j\beta x}; \quad U(x) = U_2;$$

$$\underline{I}(x) = \frac{U_2}{Z_B} e^{j\beta x}; \quad I(x) = \frac{U_2}{Z_B}.$$

Действующие значения тока и напряжения постоянны.

Холостой ход: $\underline{Z}_H = \infty$, $k = 0$ (только стоячие волны).

$$\underline{U}(x) = \frac{U_2}{Z_B} \cos \beta x; \quad U(x) = U_2 |\cos \beta x|;$$

$$\underline{I}(x) = j \frac{U_2}{Z_B} \sin \beta x; \quad I(x) = \frac{U_2}{Z_B} |\sin \beta x|.$$

Короткое замыкание: $\underline{Z}_H = 0$, $k = \infty$ (только стоячие волны).

$$\underline{U}(x) = j I_2 Z_B \sin \beta x; \quad U(x) = I_2 Z_B |\sin \beta x|;$$

$$\underline{I}(x) = I_2 \cos \beta x; \quad I(x) = I_2 |\cos \beta x|.$$

При активной нагрузке если $k > 1$ (то есть сопротивление нагрузки меньше волнового), то напряжение на нагрузке меньше напряжения падающей волны, а если $k < 1$ (сопротивление нагрузки больше волнового), то наоборот: напряжение на нагрузке больше напряжения падающей волны.

Согласованная нагрузка длинной линии.

Нагрузка, при которой $\underline{Z}_H = \frac{U_2}{I_2} = \underline{Z}_B$ называется согласованной нагрузкой линии.

В согласованном режиме линия нагружена на сопротивление, равное волновому и отсутствует отражённая волна.

Для согласованного режима справедливы выражения:

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_{np}(x) = \underline{U}_{np}(0) e^{j\gamma x} = \underline{U}_2 e^{j\gamma x}, \quad \underline{U}_{обр}(x) = 0, \quad \underline{U}_2 = \underline{U}_{np}(0) + \underline{U}_{обр}(0) = \underline{U}_{np}(0)$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}_{np}(x) = \underline{I}_2 e^{j\gamma x}, \quad \underline{I}_{обр} = 0$$

Из полученных выражений следует, что $\frac{U(x)}{I(x)} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_1}{I_1} = Z_B$, то есть в

согласованном режиме для любого поперечного сечения линии отношение комплексов $\frac{U(x)}{I(x)}$ равно волновому сопротивлению

Следствия:

- 1) Режим работы генератора, питающего согласованную линию, не изменится, если в любом сечении её разорвать и вместо отрезанной части линии включить сопротивление, равное волновому.
- 2) Входное сопротивление согласованной линии в любом сечении равно волновому.
- 3) Считая, что начальная фаза напряжения в конце линии равна нулю, т.е. $U_2 = U_1$, запишем на основании $U_2(x) = U_{пр}(x)$; $I(x) = I_{пр}(x)$ мгновенные значения напряжения и тока в любом сечении линии:

$$u(x, t) = U_{2m} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x); i(x, t) = \frac{U_{2m}}{Z_B} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x - \theta).$$

- 4) Мощность, проходящая через какое-либо сечение линии, уменьшается по мере удаления от начала линии.

$$P = UI \cos \theta = \frac{UI}{Z_B} e^{2\alpha x} \cos \theta.$$

Мощность, передаваемая по согласованной линии, называется естественной, или натуральной мощностью, она отбирается от генератора и попадает в нагрузку. Это мощность, теряемая в тепло, направленная волной, распространяющейся вдоль линии передачи, одновременно направлена внутрь проводящих поверхностей.

- 5) Энергетические свойства длинной линии характеризует параметр – коэффициент полезного действия $\eta = \frac{P_2}{P_1} = e^{-2\alpha l}$.

Отношение мощности, которая дошла до нагрузки, к мощности, которую генератор/передатчик/источник энергии отдал в линию в согласованном режиме. Альфа это погонная постоянная затухания линии, l длина линии.

- 6) В согласованной линии с потерями временная зависимость сигнала все равно искажается при передаче от генератора к нагрузке.

Этот эффект связан с частотной зависимостью фазовых скоростей волн, соответствующих спектральным составляющим сигнала, также связан с зависимостью волнового сопротивления от частоты.

2. Особенности моделей длинных линий односвязных структур линий передачи.

Особенностью моделей длинных линий односвязных структур линий передач является то, что нет возможности рассматривать первичные параметры. В односвязных линиях нет величин r_0 , Z_0 , C_0 , L_0 . Т.е. нет видимых позиций для введения интегральных характеристик напряжения (поперечного) и тока (продольного). Кроме того, введение вторичных параметров односвязных структур с применением традиционных для

двусвязных линий соотношений между током и напряжением также невозможно ввиду отсутствия последних.

При этом можно, при необходимости, ввести понятие волнового сопротивления как отношения поперечной составляющей напряженности электрического поля к поперечной составляющей напряженности магнитного поля в договорной точке поперечного сечения волноводной структуры. Но стоит учитывать, что данное понятие не имеет практического применения при расчете волновых структур.

Написанное выше справедливо для односвязных структур, как в виде полых волноводов, так и диэлектрических волноводов. Ограничим рассмотрение структурами полых волноводов.

Для определения постоянной затухания электромагнитной волны (определяет потери мощности полезного сигнала), распространяющееся вдоль волновода следуют аналогии рассмотрения волн в проводящих средах (не вводятся погонные первичные параметры). Погонные потери энергии в волноводах определяются тепловыми потерями за счет потока мощности, направленного внутрь стенок, т.е. определяемого как поток вектора Пойнтинга в направлении перпендикулярном направлению распространения волны в линии.

Потери энергии обычно малы и можно (в первом приближении) считать, что они не вызывают изменения поперечной структуры поля (вызывают изменения только амплитуды). Но постоянная распространения становится комплексной величиной.

Тогда: $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$.

При этом продольная зависимость поля аналогично волне в проводящей среде описывается множителем: $e^{\underline{\gamma}z} = e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}$,
где α - коэффициентом затухания, а β – коэффициентом фазы.

Общий вид коэффициента затухания может быть найден из энергетических соображений (по закону сохранения энергии).

$$\alpha = \frac{P_n}{2P},$$

где $P_n = P_n^{\partial} + P_n^{np}$ – *мощность потерь*,
(где оба слагаемых пока справедливы предположки, считаются независимыми),

$$\text{а } P \text{ в общем виде } P = \frac{1}{2} \int_S E_{tm} H_{tm} dS.$$

Из-за разделения мощности потерь, разделяется и коэффициент затухания:

$$\alpha = \alpha_{\partial} + \alpha_{np}; \quad \alpha_{\partial} = \frac{P_n^{\partial}}{2P}; \quad \alpha_{np} = \frac{P_n^{np}}{2P}$$

Для нас более важной является оценка потерь в проводнике, потому что прямолинейные волноводы диэлектриками обычно не заполняются и чаще находят применение полые (или, если говорить о коаксиальных линиях, то – практически полые, за исключением внутренних элементов крепления жилы) волноведущие структуры.
(α_{∂} пренебрежима в сравнении с α_{np})

Затухание, обусловленное потерями в проводнике, рассчитывается с помощью вектора Пойнтинга и рассмотрения определения полной мощности.

Формула погрешности проводника: $\alpha_{np} = \frac{p_n^{np}}{2P} = \frac{\frac{1}{2\sigma z_0} \oint_{L_n} (H_{0m})^2 dl}{2Z_e \int_S (H_{0m})^2 dS}.$

Аналогично волноводным структурам, ВОЛС (волоконно-оптические линии) характеризуются только вторичными параметрами, важнейшим из которых является потери передаваемой мощности, которые определяют длину ретрансляционного участка линии связи, т.е. расстояние на которое можно передавать сигнал без усиления.

В отличие от прямолинейного волновода свойства ВОЛС характеризуют понятия диэлектрическое затухание (поглощение) и затухание за счет рассеивание энергии в окружающие пространство (рассеивание).

Потери на рассеяние (переизлучение) энергии «разделяются» на линейное и нелинейное рассеяние.

При линейном рассеянии мощность рассеивается пропорционально мощности падающей волны. В этом случае происходит частичное изменение направления потока энергии (изменение и уменьшение потока энергии). При нелинейном рассеянии в спектре рассеиваемой мощности наблюдаются новые частотные компоненты. Приводит к увеличению спектра сигнала, что приводит к увеличению частотных искажений, а значит искажение сигнала.

Перечисленные причины соответствуют потерям и затуханию энергии в одиночных прямолинейно расположенных волоконных световодах α_v . Также при процессе изготовления ВОЛС возникают кабельные потери α_k , поэтому итоговое затухание равно $\alpha = \alpha_v + \alpha_k$.