

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н. И. Лобачевского»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСА НАГРУЗКИ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

Практикум

Рекомендовано методической комиссией
радиофизического факультета для студентов ННГУ, обучающихся
по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика» и специальностям
10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем»,
11.05.02 «Специальные радиотехнические системы»

Нижний Новгород
2022

УДК 621.317.34(075.8)

ББК 32.842я73

О-62

О-62 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСА НАГРУЗКИ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ: Составители: Зайцева А.С., Кудрин А.В., Попова Л.Л.: Практикум. — Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2022. — 19 с.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор **В.Г. Гавриленко**

В настоящей работе проводится экспериментальное исследование волноводного тракта, состоящего из генератора, измерительной линии и нескольких типов нагрузок для дециметрового диапазона длин волн. В теоретической части работы описана методика измерения импедансов и коэффициентов отражения заданных нагрузок с помощью измерительной линии. Во второй части дается описание экспериментальной установки, порядок выполнения измерений, а также изложены задания.

Работа выполняется в рамках программы радиофизического практикума студентами радиофизического факультета, прослушавшими курсы «Электродинамика» и «Прикладная электродинамика».

Ответственный за выпуск:

зам. председателя методической комиссии

радиофизического факультета ННГУ, д.ф.-м.н., профессор **Е.З. Грибова**

УДК 621.317.34(075.8)

ББК 32.842я73

© Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы	4
2. Элементы теории	4
3. Экспериментальное определение импеданса нагрузки	11
4. Практическая часть	14
4.1. Порядок работы с измерительной линией	14
4.2. Задания	15
5. Контрольные вопросы	17
Список литературы	18

1. Цель работы

Целью работы является определение импедансов и коэффициентов отражений заданных нагрузок с помощью коаксиальной измерительной линии.

2. Элементы теории

Поле в регулярной линии передачи (ЛП) может быть представлено в виде суперпозиции собственных волн, зависимость которых от времени t и координаты z вдоль линии описывается функцией вида $\cos(\omega t \mp hz + \varphi)$, или в комплексной записи — функцией $\exp[i(\omega t \mp hz + \varphi)]$. Здесь ω — круговая частота, $h = 2\pi/\lambda_{\text{в}}$ — постоянная распространения ($\lambda_{\text{в}}$ — длина волны в ЛП), φ — начальная фаза волны. Связь величин ω и h определяется дисперсионным соотношением $h = h(\omega)$.

Важной характеристикой собственной волны (моды) является характеристический импеданс Z_{\perp} , представляющий собой отношение поперечных компонент электрического и магнитного полей в бегущей волне и определяемый соотношением

$$\mathbf{E}_{\perp} = Z_{\perp} [\mathbf{H}_{\perp}, \mathbf{n}], \quad (1)$$

где \mathbf{n} — единичный вектор в направлении распространения волны. Для бегущей волны конкретного типа при отсутствии потерь в линии импеданс Z_{\perp} является действительной положительной величиной, не зависящей ни от времени, ни от координат. Для нераспространяющихся волн величина Z_{\perp} является чисто мнимой:

$$Z_{\perp} = i Z', \quad (2)$$

причем $Z' > 0$ для волн ТЕ типа, $Z' < 0$ для волн ТМ типа ¹.

В ЛП с произвольной нагрузкой на конце поле волны данного типа представляет собой суперпозицию волн, бегущих навстречу друг другу:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}_{\perp}, z, t) &= \mathbf{E}^{+}(\mathbf{r}_{\perp}, z, t) + \mathbf{E}^{-}(\mathbf{r}_{\perp}, z, t), \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}_{\perp}, z, t) &= \mathbf{H}^{+}(\mathbf{r}_{\perp}, z, t) + \mathbf{H}^{-}(\mathbf{r}_{\perp}, z, t), \end{aligned} \quad (3)$$

где знаки «+» и «-» отмечают волны, распространяющиеся в положительном и отрицательном направлениях оси z соответственно. Как следует из теории собственных волн в волноводах, для каждого типа волны можно

¹В волноводах с идеально проводящими стенками и однородным заполнением могут распространяться лишь волны ТЕ и ТМ типов. В волнах ТЕ типа электрическое поле является чисто поперечным ($\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\perp}$), а магнитное поле \mathbf{H} имеет как поперечную \mathbf{H}_{\perp} , так и продольную H_z составляющие. В волнах ТМ типа имеются составляющие \mathbf{H}_{\perp} , \mathbf{E}_{\perp} , E_z .

разделить зависимости полей от поперечных (\mathbf{r}_\perp) и продольной (z) координат и представить поле каждой из встречных волн в виде

$$\begin{aligned}\mathbf{E}^\pm(\mathbf{r}_\perp, z, t) &= \mathcal{E}(\mathbf{r}_\perp) U^\pm(z, t), \\ \mathbf{H}^\pm(\mathbf{r}_\perp, z, t) &= \mathcal{H}(\mathbf{r}_\perp) I^\pm(z, t),\end{aligned}\quad (4)$$

где $\mathcal{E}(\mathbf{r}_\perp)$ и $\mathcal{H}(\mathbf{r}_\perp)$ — соответствующим образом нормированные векторные функции, описывающие распределение электрического и магнитного полей в поперечном сечении волновода. Уравнения, описывающие поведение скалярных функций

$$\begin{aligned}U(z, t) &= U^+(z, t) + U^-(z, t), \\ I(z, t) &= I^+(z, t) + I^-(z, t),\end{aligned}\quad (5)$$

называемых в общем случае условными напряжением и током, совпадают с уравнениями для напряжения и тока некоторой эквивалентной длинной линии.

Эквивалентность описания продольной структуры полей в волноводах в терминах электромагнитных полей или в терминах токов и напряжений легче всего пояснить на примере главных ТЕМ волн двухсвязных линий передачи, например, коаксиальной линии, когда можно однозначно определить напряжение между проводниками в поперечном сечении линии U^\pm и токи I^\pm , текущие в них.

Действительно, воспользовавшись выражениями для электрического и магнитного полей главной волны (ТЕМ) коаксиальной линии передачи (рис. 1) с однородным заполнением ($\varepsilon = \text{const}$, $\mu = \text{const}$) в цилиндрической системе координат (r, φ, z)

$$E_r^\pm = \frac{A^\pm}{r} \exp\left[i\omega\left(t \mp \frac{z}{v}\right)\right], \quad H_\varphi^\pm = \pm \frac{E_r^\pm}{\eta}, \quad (6)$$

где $A^\pm = \text{const}$, $\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ — волновой импеданс среды, $v = c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ — скорость света в среде, можно вычислить напряжение между проводниками

$$U^\pm = \int_a^b E_r^\pm dr = A^\pm \ln \frac{b}{a} \exp\left[i\omega\left(t \mp \frac{z}{v}\right)\right] \quad (7)$$

и ток внутреннего проводника радиуса a

$$I_a^\pm = \frac{c}{4\pi} \oint_L H_\varphi^\pm dl = \pm \frac{A^\pm c}{2\eta} \exp\left[i\omega\left(t \mp \frac{z}{v}\right)\right] \quad (8)$$

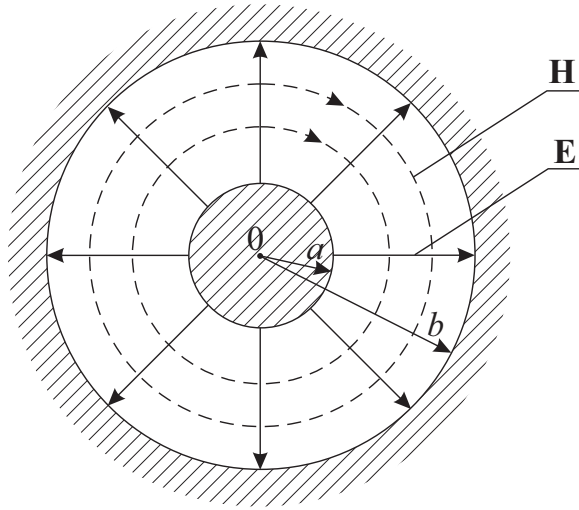


Рис. 1. Поперечное сечение коаксиальной линии передачи

(ток внешнего проводника радиуса b равен $I_b^\pm = -I_a^\pm$). При этом соотношения (4) с учетом выражений (6) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} E_r &= \mathcal{E}_r(r) U(z, t), \quad \mathcal{E}_r(r) = \frac{1}{r \ln b/a}, \\ H_\varphi &= \mathcal{H}_\varphi(r) I(z, t), \quad \mathcal{H}_\varphi(r) = \frac{2}{cr}. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя соотношения (9) в уравнения Максвелла

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{c} \frac{\partial H_\varphi}{\partial t} + \frac{\partial E_r}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

получим так называемые телеграфные уравнения для тока и напряжения

$$\begin{aligned} \frac{L}{c^2} \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial z} &= 0, \\ C \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где $C = \varepsilon/[2 \ln(b/a)]$, $L = 2\mu \ln(b/a)$ — соответственно погонные емкость и индуктивность коаксиальной ЛП (индексы \pm в (9)–(11) для краткости опущены). Телеграфные уравнения для главных ТЕМ волн линий других типов также имеют вид (11) и различаются только выражениями для погонных емкости и индуктивности.

При описании собственных мод в терминах токов и напряжений удобно ввести волновое сопротивление Z_B , равное отношению амплитуд напряжения

и тока в режиме бегущей волны

$$Z_{\text{в}} = \pm \frac{U^{\pm}}{I^{\pm}}. \quad (12)$$

Из телеграфных уравнений (11) для главных ТЕМ волн следует соотношение [1]

$$Z_{\text{в}} = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (13)$$

В частности, для коаксиальной линии

$$Z_{\text{в}} = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln(b/a). \quad (14)$$

Используя представления (3), (4), всегда можно вывести уравнения для условных напряжения и тока, выражения для эквивалентных погонных параметров и волнового сопротивления в случае ТЕ и ТМ волн. При этом эквивалентные параметры определяются неоднозначно, так как их конкретные значения зависят от выбора нормировки векторных функций $\mathcal{E}(\mathbf{r}_{\perp})$ и $\mathcal{H}(\mathbf{r}_{\perp})$.

Очевидно, что структуру полей по продольной координате z на фиксированной частоте ω можно охарактеризовать двумя эквивалентными способами: либо заданием продольных распределений комплексных амплитуд полных условных напряжения $U(z) = U^{+}(z) + U^{-}(z)$ и тока $I(z) = I^{+}(z) + I^{-}(z)$, либо заданием продольных распределений комплексных напряжения $U^{\pm}(z)$ (или токов $I^{\pm}(z)$) каждой из встречных бегущих волн. Важная информация о структуре волнового поля содержится в отношениях комплексных амплитуд: импедансе в сечении z

$$Z(z) = \frac{U(z)}{I(z)} = \frac{U^{+}(z) + U^{-}(z)}{I^{+}(z) + I^{-}(z)} \quad (15)$$

и коэффициенте отражения в сечении z

$$\Gamma(z) = \frac{U^{-}(z)}{U^{+}(z)} = -\frac{I^{-}(z)}{I^{+}(z)}. \quad (16)$$

Величины $Z(z)$ и $\Gamma(z)$ в каждом сечении связаны соотношениями

$$Z(z) = Z_{\text{в}} \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)}, \quad \Gamma(z) = \frac{Z(z) - Z_{\text{в}}}{Z(z) + Z_{\text{в}}}. \quad (17)$$

Подчеркнем, что импедансы $Z(z)$ и $Z_{\text{в}}$ определяются в общем случае неоднозначно, поскольку зависят от нормировки функций $\mathcal{E}(\mathbf{r}_{\perp})$ и $\mathcal{H}(\mathbf{r}_{\perp})$, тогда как величина $\Gamma(z)$ определяется однозначно.

Зависимость Γ от продольной координаты z вдоль однородного участка ЛП имеет вид

$$\Gamma(z) = \frac{U^-(z)}{U^+(z)} = \frac{U^-(z_0) e^{ih(z-z_0)}}{U^+(z_0) e^{-ih(z-z_0)}} = \Gamma(z_0) e^{i2h(z-z_0)}. \quad (18)$$

Заметим, что модуль величины $\Gamma(z)$ от координаты z не зависит: $|\Gamma(z)| = \text{const}$. Зависимость импеданса Z от координаты z может быть установлена из формул (17), (18) и имеет вид

$$Z(z) = Z_B \frac{Z(z_0) - iZ_B \operatorname{tgh}(z - z_0)}{Z_B - iZ(z_0) \operatorname{tgh}(z - z_0)}. \quad (19)$$

Формулы пересчета коэффициента отражения (18) и пересчета импеданса (19) позволяют вычислить коэффициент отражения $\Gamma(z)$ и импеданс $Z(z)$ в любом сечении $z = \text{const}$ однородного волновода по известным величинам $\Gamma(z_0)$ и $Z(z_0)$ в любом другом сечении $z_0 = \text{const}$.

На однородных участках ЛП величины $\Gamma(z)$ и $Z(z)$ являются периодическими функциями продольной координаты z с периодом, равным половине длины собственной бегущей волны $\lambda_B = 2\pi/h$. Амплитуды напряжения и тока в однородном отрезке также периодически (с периодом $\lambda_B/2$) меняются от точки к точке:

$$|U(z)| = |U^+(z)| |1 + \Gamma(z_0) e^{i2h(z-z_0)}|; \quad |U^+(z)| = \text{const}, \quad (20)$$

$$|I(z)| = |I^+(z)| |1 - \Gamma(z_0) e^{i2h(z-z_0)}|; \quad |I^+(z)| = \text{const}. \quad (21)$$

Из сравнения (20), (21) видно, что амплитуды колебаний U и I при изменении z осциллируют в противофазе: там, где достигается максимум $|U|$ (пучность U), имеет место минимум $|I|$ (узел I), и наоборот. Расстояние между ближайшими узлами или пучностями одной и той же величины равно $\lambda_B/2$, что может быть использовано для измерения длины волны в ЛП.

Отношение максимального и минимального значений амплитуды напряжения (или тока) называется коэффициентом стоячей волны (КСВ):

$$\text{КСВ} = K = \frac{|U|_{\max}}{|U|_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (22)$$

Обратная величина называется коэффициентом бегущей волны (КБВ):

$$\text{КБВ} = \frac{1}{K} = \frac{|U|_{\min}}{|U|_{\max}} = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|}. \quad (23)$$

Поскольку $0 \leq |\Gamma| \leq 1$, то $1 \leq \text{КСВ} \leq \infty$, а $0 \leq \text{КБВ} \leq 1$. Выражая $|\Gamma|$ из (22), найдем связь модуля коэффициента отражения с коэффициентом стоячей волны K :

$$|\Gamma| = \frac{K - 1}{K + 1}. \quad (24)$$

Вычислим входной импеданс $Z_{\text{вх}}$ отрезка ЛП с длиной l и волновым импедансом $Z_{\text{в}}$ по заданному импедансу нагрузки $Z_{\text{н}}$ на его конце (рис. 2).

Для вычисления $Z_{\text{вх}}$ в формуле (19) необходимо положить $z - z_0 = -l$, $Z(z_0) = Z_{\text{н}}$. В этом случае получим

$$Z_{\text{вх}} = Z(z_0 - l) = Z_{\text{в}} \frac{Z_{\text{н}} + iZ_{\text{в}} \operatorname{tg} hl}{Z_{\text{в}} + iZ_{\text{н}} \operatorname{tg} hl}. \quad (25)$$

Наиболее простой результат получается в случае *согласованной нагрузки*, когда $Z_{\text{н}} = Z_{\text{в}}$, $\Gamma(z_0) = 0$ (см. формулу (17)), имеющим большое практическое значение. При этом согласно (25)

$$Z_{\text{вх}} = Z(z_0 - l) = Z_{\text{в}}, \quad \Gamma_{\text{вх}} = \Gamma(z_0 - l) = 0,$$

так что независимо от длины отрезка l в нем реализуется режим чисто бегущей волны, и вся мощность попадает в нагрузку. Заметим, что обеспечение согласования нагрузки с волновым трактом является одной из важнейших задач проектирования ЛП.

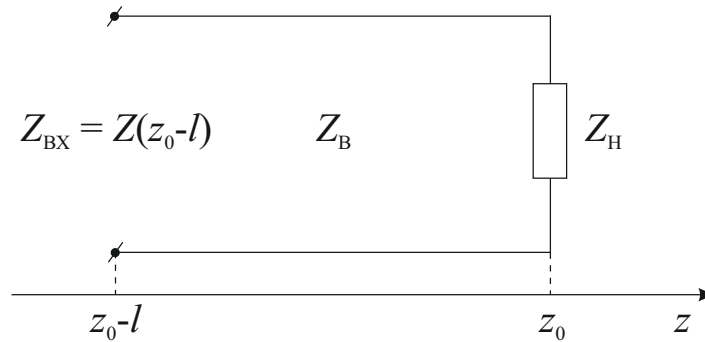


Рис. 2. Отрезок ЛП с нагрузкой на конце

Большое практическое значение имеет также анализ входного импеданса *закороченного на конце* отрезка волновода. В этом случае ($Z_{\text{н}} = 0$, $\Gamma(z_0) = -1$) входной импеданс будет чисто реактивным ($\operatorname{Re} Z_{\text{вх}} = 0$), а его величина и знак будут зависеть от длины отрезка l по периодическому закону

$$Z_{\text{вх}} = Z(z_0 - l) = i Z_{\text{в}} \operatorname{tg} hl. \quad (26)$$

Характер (емкостной или индуктивный) входного импеданса закороченного отрезка легко также определить по виду преобладающей энергии (электрической или магнитной), запасенной в отрезке.

Из рис. 3 а и 3 б видно, что на длине короткозамкнутого отрезка в диапазоне $\frac{\lambda}{2} n < l < \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2} n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) преобладает запасенная

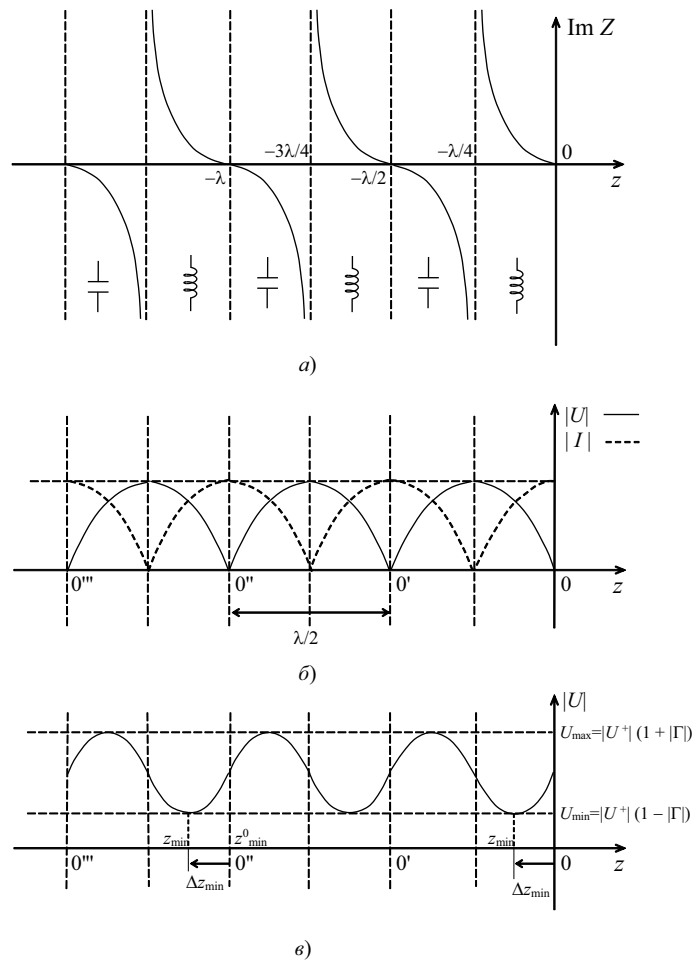


Рис. 3. а) Входной импеданс закороченного отрезка линии передачи; б) распределение модуля напряжения и тока вдоль линии в режиме короткого замыкания ($Z_{\text{H}} = 0$); в) распределение модуля напряжения вдоль линии передачи при $Z_{\text{H}} \neq Z_{\text{B}}$

магнитная энергия и входной импеданс имеет индуктивный характер, а в диапазоне $\frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2} n < l < \frac{\lambda}{2}(n + 1)$ преобладает запасенная электрическая энергия и входной импеданс будет емкостным. При длинах отрезка, кратных четверти длины волны, запасаемые электрическая и магнитная энергии сравниваются и наступает резонанс. Попробуйте самостоятельно определить, при каких длинах l отрезок короткозамкнутой линии соответствует параллельному, а при каких последовательному контурам. Короткозамкнутые отрезки волноводов широко используются для создания реактивных и резонансных элементов.

В случае *режима холостого хода* ($Z_{\text{H}} = \infty$)

$$Z_{\text{BX}} = -i Z_{\text{B}} \text{ctg } hl. \quad (27)$$

Выясните самостоятельно, как зависит характер входного импеданса отрезка от его длины в этом случае.

3. Экспериментальное определение импеданса нагрузки

Блок-схема экспериментальной установки для измерения импеданса нагрузки с помощью измерительной линии (ИЛ) представлена на рис. 4.

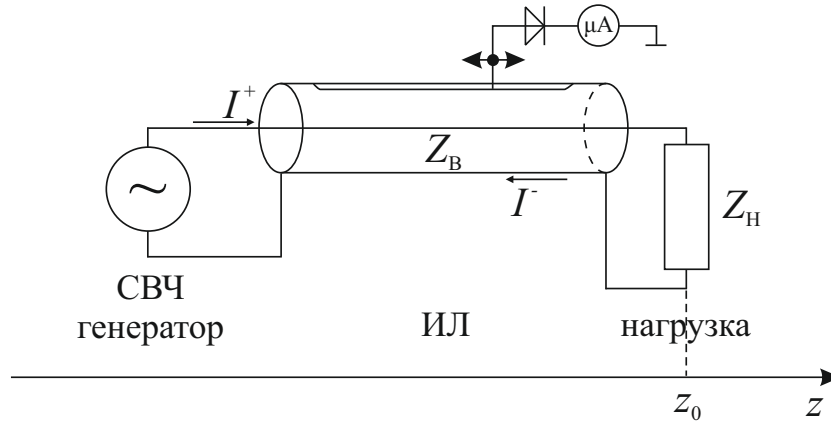


Рис. 4. Блок-схема ИЛ с подключенной нагрузкой Z_H и СВЧ генератором

К одному концу ИЛ с волновым импедансом Z_B подключается генератор СВЧ диапазона, к другому — нагрузка с импедансом Z_H . Измерительные линии на основе коаксиальной или волноводной ЛП снабжены зондом, перемещающимся вдоль щели в стенке ИЛ. Зонд штыревого типа располагается вдоль силовых линий электрического поля и отводит часть СВЧ мощности, передаваемой по линии².

Для детектирования СВЧ сигнала зонда в ИЛ обычно применяют кристаллические детекторы, соединенные с чувствительным индикатором (микроамперметром). Ток через индикатор является функцией напряжения в соответствующей точке ИЛ. Зависимость тока в цепи детектора \mathcal{I}_d от приложенного напряжения $|U|$ является нелинейной, поэтому для измерений с помощью ИЛ необходимо сначала произвести градуировку индикаторного устройства.

Градуировка выполняется следующим образом. Для закороченной на конце ИЛ снимается зависимость тока в цепи детектора от координаты зонда z при его перемещении вдоль линии: $\mathcal{I}_d = \mathcal{I}_d(z - z_{\min}^0)$, где z_{\min}^0 — координата минимума стоячей волны. Эту зависимость снимают для средней части ИЛ в пределах $z_{\min}^0 \leq z \leq z_{\min}^0 + \frac{\lambda}{4}$, чтобы в обследуемый участок попали точки минимума $\mathcal{I}_{d\min}$ и максимума $\mathcal{I}_{d\max} = \mathcal{I}_0$ тока детектора. По результатам

²В прямоугольном волноводе при работе на волне низшего типа продольная щель располагается в середине широкой стенки, где поперечные токи равны нулю.

измерений строится зависимость $I_d = \mathcal{I}_d/\mathcal{I}_0$ (см. рис. 5). При закороченном конце в ИЛ устанавливается режим чисто стоячей волны ($K = \infty$), для которого напряжение вдоль линии изменяется по закону

$$\mathcal{U} = \left| \frac{U}{U_0} \right| = \left| \sin \frac{2\pi}{\lambda} (z - z_{\min}^0) \right|. \quad (28)$$

Построим эту зависимость (синусоиду) так, чтобы она проходила через точки z_{\min}^0 и $z_{\min}^0 + \frac{\lambda}{4}$ (рис. 5). Она является характеристикой идеального детектора, для которого ток выражается линейно через напряжение.

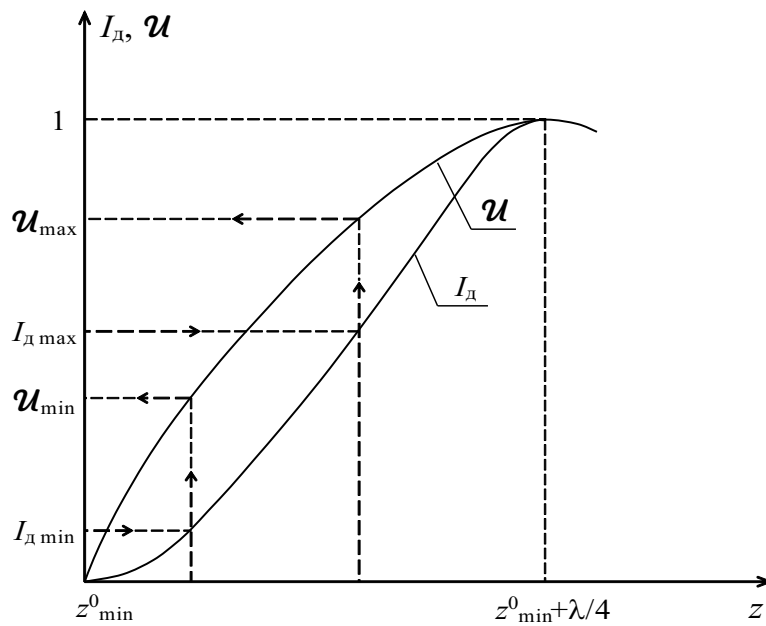


Рис. 5. Градуировочные кривые индикаторного устройства

При подключенной к концу ИЛ нагрузке с импедансом $Z_H \neq 0$ для нахождения КСВ, равного $K = \frac{|U_{\max}|}{|U_{\min}|}$, необходимо экспериментально найденные токи в максимуме $I_{d\max} = \left(\mathcal{I}_d/\mathcal{I}_0 \right)_{\max}$ и минимуме $I_{d\min} = \left(\mathcal{I}_d/\mathcal{I}_0 \right)_{\min}$ пересчитать по идеальной характеристике в напряжения $\mathcal{U}_{\max} = \left| U/U_0 \right|_{\max}$ и $\mathcal{U}_{\min} = \left| U/U_0 \right|_{\min}$ соответственно, как показано на рис. 5 стрелками. Коэффициент стоячей волны находится как отношение $K = \mathcal{U}_{\max}/\mathcal{U}_{\min}$.

Получим формулу для экспериментального определения импеданса нагрузки с помощью ИЛ. Для этого найдем вначале импеданс в точке $z = z_{\min}$

минимума напряжения в ЛП:

$$\begin{aligned} Z(z_{\min}) &= \frac{U(z_{\min})}{I(z_{\min})} = \frac{|U^+| - |U^-|}{\frac{|U^+|}{Z_B} + \frac{|U^-|}{Z_B}} = \\ &= Z_B \frac{1 - \frac{|U^-|}{|U^+|}}{1 + \frac{|U^-|}{|U^+|}} = Z_B \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|} = \frac{Z_B}{K}. \end{aligned} \quad (29)$$

Воспользуемся формулой (19), в которой положим $z = z_{\min}$. С учетом (29) будем иметь

$$\frac{Z_B}{K} = Z_B \frac{Z(z_0) - i Z_B \operatorname{tg} h(z_{\min} - z_0)}{Z_B - i Z(z_0) \operatorname{tg} h(z_{\min} - z_0)}. \quad (30)$$

Пусть z_0 — координата точки подключения нагрузки с импедансом $Z(z_0) = Z_H$. Тогда выражение (30) дает

$$\frac{Z_B}{K} = Z_B \frac{Z_H - i Z_B \operatorname{tg} h(z_{\min} - z_0)}{Z_B - i Z_H \operatorname{tg} h(z_{\min} - z_0)}. \quad (31)$$

Из данного соотношения найдем импеданс нагрузки

$$Z_H = Z_B \frac{i - K \operatorname{tg} h(z_{\min} - z_0)}{iK - \operatorname{tg} h(z_{\min} - z_0)} = Z_B \frac{i + K \operatorname{tg} h \Delta z_{\min}}{iK + \operatorname{tg} h \Delta z_{\min}}, \quad (32)$$

где $\Delta z_{\min} = z_0 - z_{\min}$ — расстояние между точкой минимума (узлом) напряжения U и концом ИЛ с нагрузкой (заметим, что в нашем случае $z_0 = 0$; см. рис. 3б).

При работе с ИЛ не всегда бывает удобно измерять расстояние Δz_{\min} от нагрузки до ближайшего минимума напряжения (рис. 3б). Представляется более удобным отсчитывать положение минимума напряжения относительно одного из так называемых «условных концов» измерительной линии $0'$, $0''$, $0'''$, ..., отстоящих от точки подключения нагрузки на целое число полуволн (рис. 3б). Координаты условных концов могут быть измерены как координаты узлов стоячей волны напряжения в режиме короткого замыкания на конце линии. Выбирая один из условных концов линии z_{\min}^0 (например, $0''$ на рис. 3б и 3в) и определяя (при подключенной к ИЛ нагрузке) координату минимума напряжения z_{\min} , ближайшего к этому «условному концу», находим величину Δz_{\min} в формуле (32):

$$\Delta z_{\min} = z_{\min}^0 - z_{\min}.$$

Таким образом, импеданс нагрузки, подключенной к концу ИЛ, может быть вычислен по формуле

$$Z_{\text{н}} = Z_{\text{в}} \frac{i + K \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{в}}} \Delta z_{\text{min}} \right)}{iK + \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{в}}} \Delta z_{\text{min}} \right)}, \quad (33)$$

где $Z_{\text{в}}$ — волновое сопротивление линии, $\lambda_{\text{в}}$ — длина волны в ней, K — коэффициент стоячей волны (КСВ), Δz_{min} — расстояние от условного конца линии до ближайшего к нему минимума напряжения, причем $\Delta z_{\text{min}} > 0$ при расположении минимума (относительно условного конца) со стороны генератора, $\Delta z_{\text{min}} < 0$ при расположении минимума со стороны нагрузки. Все измерения, выполняемые в данной работе, основаны на формуле (33).

4. Практическая часть

4.1. Порядок работы с измерительной линией

1. Коаксиальная измерительная линия (ИЛ) Р1–22 имеет волновое сопротивление $Z_{\text{в}} = 50$ Ом и позволяет измерять КСВ и фазу отраженной от нагрузки волны в диапазоне частот $f = 1800 \div 2800$ МГц, что соответствует длинам волн от 17 до 11 см соответственно. Точность измерения КСВ в пределах $1 \div 10$ не ниже $\pm 5\%$. Точность отсчета координаты положения детекторного зонда в ИЛ при использовании нониуса составляет 0,05 мм, без использования нониуса — 0,5 мм. Рекомендуемое значение рабочей частоты генератора $f_0 = 2000$ МГц, затухание сигнала на выходе генератора от 6 до 3 дБ в зависимости от рабочей частоты и качества настройки детекторной камеры. Установка считается настроенной и готовой к выполнению измерений, если индикатор детекторной камеры дает максимальные показания в правой части шкалы. Точность отсчета показаний индикатора составляет 0,5 деления шкалы. После выполнения настройки установки подключить к линии закорачивающий элемент и выполнять пункты 2–4 в режиме короткозамкнутой ИЛ.
2. Определить координату z_{min}^0 условного конца ИЛ. Для этого просмотреть картину изменения поля вдоль измерительной линии, выбрать 1-ый от правого ограничителя каретки минимум (точку

с нулевым значением) поля в ИЛ, если возможно измерение его координаты методом «вилки», в противном случае выбрать 2-ой минимум. Эта точка становится началом отсчета при выполнении всех последующих заданий.

3. Определить длину волны как удвоенный пространственный период продольной структуры поля.
4. Снять градуировочную кривую детектора. При этом для уменьшения ошибки в определении координат точек максимума и минимума используют метод «вилки», т.е. вблизи экстремумов кривой показания снимают симметрично относительно точек экстремумов, координата экстремума определяется далее как среднее между координатами симметричных (т.е. лежащих на одном уровне, но по разные стороны от точки экстремума) точек с учетом параболического характера градуировочной кривой на данных участках. Между точками минимума и максимума существует участок кривой, близкий к линейному, который содержит точку перегиба. Таким образом, для построения градуировочной кривой достаточно снять 9 точек.
5. Определить импедансы и коэффициенты отражения предложенных нагрузок. Для этого:
 - а) подключить выбранную нагрузку (см. Задания) к ИЛ;
 - б) установить каретку с детектором в точку отсчета (координату условного конца ИЛ). Если в этой точке находится минимум, произвести замену результата. Если в этой точке минимум отсутствует, то двигать каретку влево (в сторону генератора) до достижения ближайших минимума и максимума, записать координату узла (минимума) поля z_{\min} ; измерить значение поля в узле и пучности и, если нужно, уточнить его по градуировочной кривой детектора; по снятым измерениям вычислить КСВ;
 - в) вычислить величину Δz_{\min} с учетом ее знака;
 - г) определить импеданс нагрузки Z_n по формуле (33);
 - д) вычислить значение коэффициента отражения Γ от нагрузки по формуле (17).

4.2. Задания

1. Определить точность измерений путем сравнения данных, полученных экспериментально, с расчетными. Для этого в качестве эталонной

нагрузки удобно взять отрезок коаксиальной линии, параметры которой легко рассчитываются, — эталон (см. рис. 6).

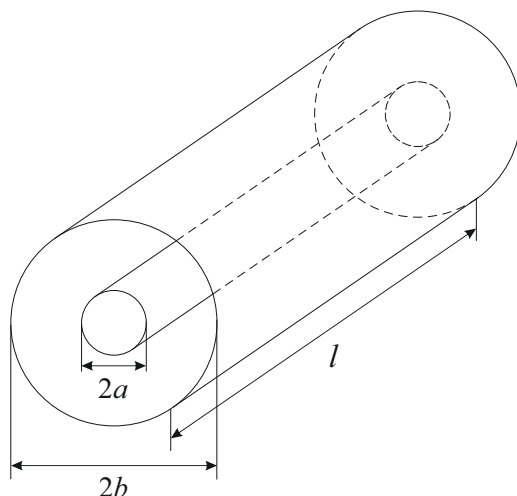


Рис. 6. Геометрия эталона

а) рассчитать величину входного импеданса короткозамкнутого и разомкнутого на конце незаполненного эталона по его геометрическим размерам:

волновое сопротивление

$$Z_B^{\text{ЭГ}} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln(b/a) = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \lg(b/a), \quad (1)$$

входной импеданс закороченного эталона

$$Z_{\text{ВХ}}^{\text{ЭГ}} = i Z_B^{\text{ЭГ}} \operatorname{tg} hl, \quad (2)$$

входной импеданс открытого на конце эталона

$$Z_{\text{ВХ}}^{\text{ЭГ}} = -i Z_B^{\text{ЭГ}} \operatorname{ctg} hl, \quad (3)$$

где $h = \sqrt{\varepsilon} h_0$ — постоянная распространения волны в эталонной линии, заполненной диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε (в случае незаполненной эталонной линии $\varepsilon = 1$), h_0 — постоянная распространения волны в незаполненной эталонной линии (без диэлектрика), a, b, l — геометрические размеры эталонной линии (см. рис. 6).

б) подсоединить эталон к ИЛ с помощью адаптера, произвести измерения входных импедансов закороченного эталона и эталона с открытым концом по п. 5 раздела 4.1 (Порядок работы с ИЛ).

в) сравнить измеренные импедансы с расчетными значениями и определить точность измерений.

К выполнению следующих заданий можно приступить лишь после удовлетворительного совпадения результатов (погрешность $\leq 10\%$).

2. Измерить импедансы предложенных нагрузок, как это описано в п. 5 раздела 4.1 (Порядок работы с ИЛ):

а) измерить входные импедансы короткозамкнутого и разомкнутого эталона, заполненного диэлектриком (плексигласом); определить диэлектрическую проницаемость ε заполнения;

б) измерить импеданс заданного активного сопротивления $R = 47$ Ом, определить индуктивность подводящих проводов;

в) измерить импеданс керамического конденсатора с неизвестной емкостью; определить собственную частоту данной нагрузки, считая, что подводящие провода обладают некоторой индуктивностью (для выполнения данного задания измерения необходимо выполнить при двух значениях частоты генератора с отличием не менее 30% одного от другого).

5. Контрольные вопросы

1. Нарисуйте качественный вид пространственных распределений амплитуд полей E_{\perp} и H_{\perp} (или U и I) вдоль ЛП для следующих нагрузок:

а) $Z_{\text{н}} = 0$; б) $Z_{\text{н}} = \infty$; в) $Z_{\text{н}} = i\omega L$; г) $Z_{\text{н}} = 1/i\omega C$; д) $Z_{\text{н}} = R = Z_{\text{в}}$; е) $Z_{\text{н}} = R > Z_{\text{в}}$; ж) $Z_{\text{н}} = R < Z_{\text{в}}$; з) $Z_{\text{н}} = R + iX$.

2. В какую сторону сдвигаются (к генератору или к нагрузке) узлы и пучности полей по отношению к режиму короткого замыкания в случае емкостных и индуктивных нагрузок?

3. Как зависит величина входного импеданса $Z_{\text{вх}}$ отрезка ЛП от ее длины при следующих нагрузках:

а) $Z_{\text{н}} = 0$; б) $Z_{\text{н}} = \infty$; в) $Z_{\text{н}} = R = Z_{\text{в}}$; г) $Z_{\text{н}} = R \neq Z_{\text{в}}$.

4. Можно ли добиться согласования ЛП с заданным волновым сопротивлением $Z_{\text{в}}$ и чисто активной нагрузкой $Z_{\text{н}} = R \neq Z_{\text{в}}$ с помощью включения между ними отрезка ЛП (т.н. трансформатора сопротивлений) со специально подобранным волновым сопротивлением $Z_{\text{тр}} = Z_{\text{в1}}$? Каковы должны быть длина согласующего трансформатора

(L) и его волновое сопротивление ($Z_{в1}$)? Можно ли обеспечить согласование в случае комплексной нагрузки?

5. Как сказываются потери в ИЛ на результатах измерения импеданса?

Список литературы

1. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.
2. Вольман В. И., Пименов Ю. В. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1971. 487 с.
3. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т.1. М.: Высшая школа, 1970. 439 с.
4. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1978. 543 с.
5. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ. М.: Высшая школа, 1990. 334 с.
6. Левин Л. Теория волноводов. М.: Радио и связь, 1981. 311 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСА НАГРУЗКИ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

Составители:

Анна Сергеевна **Зайцева**
Александр Владимирович **Кудрин**
Людмила Лазаревна **Попова**

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать _____ 2022. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,2. Заказ N _____. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ННГУ им. Н. И. Лобачевского.
603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37