

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Цель работы: определение волнового сопротивления, погонных емкости и индуктивности коаксиального кабеля.

Радиочастотные кабели являются составными элементами любой радиоустановки, в том числе приемно-передающих станций.

Достоинством радиочастотных кабелей являются:

- 1) возможность передачи чрезвычайно широкого спектра частот при сравнительно малом затухании;
- 2) высокая степень защищенности от внешних источников помех;
- 3) малый антенный эффект;
- 4) простота конструкции и монтажа.

Основным типом радиочастотного кабеля является коаксиальный, благодаря высокой частотно-пропускной способности, хорошим экранирующим свойствам и другим технико-экономическим показателям. При тех же габаритах симметричный кабель, сравнительно с коаксиальным, имеет в 1,5 раза большее затухание. В отличие от других типов линий связи и электропередачи, где исчисление электрических характеристик ведется в пересчете на километр, в радиочастотных кабелях все параметры рассчитываются на метр.

Исходные уравнения кабельной цепи. Распространение электромагнитной энергии по кабелям происходит по закону, сформулированному для однородной двухпроводной линии в виде следующих основных уравнений передачи:

$$\begin{aligned} \dot{U}_x &= \dot{U}_0 \operatorname{ch} \gamma x - \dot{I}_0 Z \operatorname{sh} \gamma x, \\ \dot{I}_x &= \dot{I}_0 \operatorname{ch} \gamma x - \frac{\dot{U}_0}{Z} \operatorname{sh} \gamma x, \end{aligned} \quad (1)$$

где U_x, I_x - напряжение и ток в любой точке двухпроводной линии;

U_0, I_0 - напряжение и ток в начале двухпроводной линии;

Z - волновое сопротивление;

γ - постоянная распространения.

Эти уравнения позволяют установить распределение напряжения и тока вдоль однородной линии. Для определения напряжений и токов в начале линии уравнения передачи (1) примут вид:

$$\begin{aligned}
 U_0 &= U_e \operatorname{ch} \gamma l + I_e Z \operatorname{sh} \gamma l, \\
 I_0 &= I_e \operatorname{ch} \gamma l + \frac{U_e}{Z} \operatorname{sh} \gamma l,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где l - длина линии;

U_e, I_e - напряжение и ток в конце двухпроводной линии.

Приведенные в формулах (1) и (2) волновое сопротивление цепи Z и постоянная распространения γ называются вторичными параметрами однородной линии или коаксиального кабеля.

Волновое сопротивление цепи Z - это сопротивление, которое встречает электромагнитная волна при распространении по линии в режиме бегущей волны, т.е. без отражения:

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z| e^{-j\varphi}
 \tag{3}$$

Постоянная распространения состоит из двух частей: постоянной затухания β и фазовой постоянной α .

$$\gamma = \beta + j\alpha = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}.
 \tag{4}$$

Постоянная затухания характеризует уменьшение абсолютного значения тока, напряжения или мощности при прохождении l м цепи; фазовая постоянная характеризует изменение угла вектора тока (напряжения) на участке цепи. $\beta = 1/\lambda$ в линии без потерь

$$\beta = 0 \text{ и } \gamma = j\alpha$$

Различают три принципиально различных режима передачи энергии по кабельным цепям.

1. Режим бегущей волны, соответствующий случаю согласованной нагрузки ($Z_H = Z$). В этом случае вся энергия полностью без отражения поступает в конец линии и эффективно поглощается приемником.

2. Режим стоячей волны. Линия на конце замкнута накоротко (короткое замыкание $Z_H = 0$) или разомкнута на конце (холостой ход $Z_H = \infty$). В этом случае электромагнитная энергия полностью отражается от конца, и в линии устанавливается стоячие волны.

3. Режим несогласованной нагрузки. Линия нагружена на любое сопротивление, отличное от Z ($Z_H \neq Z$). В этом случае также наблюдается явление отражения энергии, и в приемник поступает лишь часть дошедшей до конца линии энергии.

Режим стоячей волны. При разомкнутых на конце проводах (холостой ход) $j_e = 0$, и уравнения передачи (2) примут вид:

$$U_0 = U_e \operatorname{ch} \gamma l,$$

$$j_0 = \frac{U_e}{Z} \operatorname{sh} \gamma l.$$

Входное сопротивление цепи будет:

$$Z_{вх} = Z_{\infty} = \frac{U_0}{j_0} = Z \operatorname{ctg} \gamma l.$$

В случае короткого замыкания на конце линии $U_e = 0$, и уравнения передачи будут:

$$U_0 = Z I_e \operatorname{sh} \gamma \ell,$$

$$I_0 = I_e \operatorname{ch} \gamma \ell.$$

Входное сопротивление цепи:

$$Z_{Bx} = Z_0 = Z \operatorname{th} \gamma \ell.$$

В случае разомкнутой или короткозамкнутой линии энергия отражается от ее конца, а в цепи устанавливаются стоячие волны. Так как линия имеет определенное затухание, то эти волны, проходя по цепи, уменьшаются по амплитуде. Для линии без потерь ($G=0, R=0$) вторичные параметры (3) и (4) имеют вид:

$$\gamma = j\omega\sqrt{LC}, \quad \beta = 0, \quad \alpha = \omega\sqrt{LC} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho.$$

Гиперболические уравнения передачи для линии без потерь принимают тригонометрическую форму:

$$U_x = U_e \cos \alpha x + j I_e \rho \sin \alpha x;$$

$$I_x = I_e \cos \alpha x + \frac{j U_e}{\rho} \sin \alpha x.$$

Входное сопротивление такой цепи определится формулой:

$$Z_{вх} = \frac{U_x}{I_x} = \rho \frac{Z_H \cos \alpha x + j \rho \sin \alpha x}{\rho \cos \alpha x + j Z_H \sin \alpha x} \quad (6)$$

Для короткозамкнутой линии (короткое замыкание) $Z_H = 0$, $U_e = 0$ и входное сопротивление определяется формулой:

$$Z_{вх} = Z_0 = j \rho \operatorname{tg} \alpha x. \quad (7)$$

Для разомкнутой на конце линии (холостой ход) $Z_H = \infty$, $I_e = 0$

$$Z_{вх} = Z_{\infty} = -j \rho \operatorname{ctg} \alpha x. \quad (8)$$

Входные сопротивления короткозамкнутой и разомкнутой линий без потерь, определяемые соотношениями (7) и (8), чисто реактивные и зависят от длины линии. На рис. I показаны графики зависимости величины входного сопротивления от длины линии для разомкнутой (рис. I, а) и короткозамкнутой (рис. I, б) линий.

Из графика видно, что входное сопротивление разомкнутой ли-

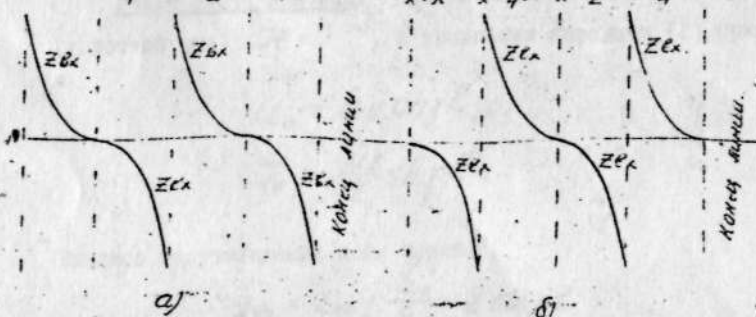


Рис. I.

нии минимально, если длина ее такова, что в ней укладывается нечетное число четвертей длин волн; т.е. если длина линии удовлетворяет соотношению:

$$l = (2n + 1) \frac{\lambda_k}{4}. \quad (9)$$

Входное сопротивление короткозамкнутой линии минимально, если длина ее такова, что в ней укладывается целое число пол-волн, т.е. если выполняется соотношение:

$$l = n \frac{\lambda_k}{4}. \quad (10)$$

При этом на входе линии имеет место узел напряжения и пучность тока.

Для расчета параметров кабеля C_k и ρ необходимо знать значение относительной диэлектрической проницаемости ϵ_z диэлектрика кабеля, которую можно определить из соотношения для длин волн в кабеле и в воздухе:

$$\lambda_k = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_z}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_z}}, \quad (11)$$

где c - скорость света.

Относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_z диэлектрика коаксиального кабеля можно определить двумя методами: методом "холостого хода", когда сопротивление нагрузки кабеля $Z_n = \infty$ и методом "короткого замыкания", когда сопротивление нагрузки кабеля $Z_n = 0$.

I. Определение ϵ_k диэлектрика коаксиального кабеля методом "холостого хода".

Когда частота электромагнитных колебаний такова, что в кабеле укладывается нечетное число четвертей длины волны, т.е. длина волны в кабеле λ_k удовлетворяет соотношению (9), входное сопротивление кабеля минимально. Если соотношению (9) удовлетворяют две различные длины волн λ_{k1} и λ_{k2} , следовательно две частоты f_1 и f_2 , то (9) можно записать в виде:

$$\ell = (2n_1 + 1) \frac{\lambda_{k1}}{4} = (2n_2 + 1) \frac{\lambda_{k2}}{4}. \quad (12)$$

Из равенства (12) можно определить значения n_1 и n_2 , которым соответствуют f_1 и f_2 . В равенстве (12), заменив n_2 на $(n_1 + 1)$, получим:

$$(2n_1 + 1) \frac{\lambda_{k1}}{4} = [2(n_1 + 1) + 1] \frac{\lambda_{k2}}{4}.$$

Подставляя в (12) выражение для λ_k , получим:

$$\ell = (2n_1 + 1) \frac{1}{4} \frac{c}{f_1 \sqrt{\epsilon_2}} = (2n_2 + 1) \frac{1}{4} \frac{c}{f_2 \sqrt{\epsilon_2}}, \quad (13)$$

откуда

$$\epsilon_{2k} = \left[(2n_k + 1) \frac{c}{4f_k \ell} \right]^2, \quad (14)$$

где $k = 1, 2, \dots$

Подставив в (13) значение $n_2 = n_1 + 1$, получим:

$$(2n_1 + 1) \frac{1}{4f_1} = [2(n_1 + 1) + 1] \frac{1}{4f_2},$$

откуда

$$\eta_1 = \frac{3f_1 - f_2}{2(f_2 - f_1)}, \quad \eta_2 = \eta_1 + 1, \quad \eta_3 = \eta_2 + 1. \quad (15)$$

и т.д.

2. Определение ϵ_2 диэлектрика коаксиального кабеля методом "короткого замыкания". Когда частота электромагнитных колебаний такова, что в кабеле укладывается целое число длин полувольт, т.е. λ_k удовлетворяет соотношению (10), входное сопротивление кабеля минимально. Для таких двух частот f_1 и f_2 (10) можно представить в виде равенства:

$$l = \eta_1 \frac{\lambda_{k1}}{2} = \eta_2 \frac{\lambda_{k2}}{2}; \quad \text{так как } \lambda_k = \frac{c}{f\epsilon_2},$$

то

$$l = \eta_1 \frac{1}{2} \frac{c}{f_1 \epsilon_2} = \eta_2 \frac{1}{2} \frac{c}{f_2 \epsilon_2}, \quad (16)$$

откуда

$$\epsilon_2 = \left(\frac{\eta_2 c}{2 f_2 l} \right)^2, \quad (17)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$

Из (16) можно найти значения η_1 и η_2 , для этого, подставив

в (16) $\eta_2 = \eta_1 + 1$, получим:

$$\frac{\eta_1}{f_1} = \frac{\eta_1 + 1}{f_2},$$

откуда

$$n_1 = \frac{f_1}{f_2 - f_1}, \quad n_2 = n_1 + 1, \quad n_3 = n_2 + 1. \quad (18)$$

Формулы для расчета параметров коаксиального кабеля. Расчет погонной индуктивности коаксиального кабеля с достаточной степенью точности можно производить по формуле:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{d} \left[\frac{\text{Гн}}{\text{м}} \right], \quad (19)$$

где d - диаметр внутреннего провода;

D - внутренний диаметр внешнего провода.

Емкость коаксиального кабеля определяется по формуле емкости цилиндрического конденсатора:

$$C_K = \frac{\epsilon_2}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D}{d}} \left[\frac{\text{Ф}}{\text{м}} \right]. \quad (20)$$

Используя формулы (19) и (20) для расчета L и C_K , получим выражение для волнового сопротивления коаксиального кабеля в следующем виде:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C_K}} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_2}} \ln \frac{D}{d} \left[\text{ом} \right]. \quad (21)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

I. Найти значение ϵ_2 диэлектрика коаксиального кабеля методом "холостого хода". Для этого ко входу разомкнутого на конце кабеля подключить генератор Г4-18А и ламповый вольтметр. Изменить частоту генератора, добить-

ся минимального входного сопротивления (минимального напряжения на входе кабеля). Найденные при этом частоты (длины волны λ_k) соответствуют формуле (9). Получив таким образом частоты f_1 , f_2 , f_3 , определить по формуле (15) значение n , а затем n_2 и n_3 , после чего, воспользовавшись соотношением (14), определить значения ϵ_{z1} , ϵ_{z2} и ϵ_{z3} . Величину относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика кабеля ϵ_2 найти как среднее:

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_{z1} + \epsilon_{z2} + \epsilon_{z3}}{3}$$

2. Найти значение ϵ_2 диэлектрика коаксиального кабеля методом "короткого замыкания". При помощи перемычки переключить между собой внутренний и внешний проводники кабеля на его конце. Затем по минимальным показаниям вольтметра найти три частоты f_1 , f_2 , f_3 , на которых входное сопротивление кабеля минимально. Зная значения частот, по формуле (18) найти значения для n , а затем n_2 и n_3 , после чего по формуле (17) определить значения ϵ_{z1} , ϵ_{z2} и ϵ_{z3} . Найти среднее значение ϵ_2 .

3. Сопоставить результаты, полученные в п.1-2 и найти среднее арифметическое ϵ_2 .

4. Используя найденные в п.3 значения относительных диэлектрических проницаемостей диэлектриков кабелей, определить по формулам (19), (20) и (21) параметры кабелей.

ЛИТЕРАТУРА

Белорусов Н.И., Гроднев Н.И. Радиочастотные кабели. М., Энергоиздат, 1952.