

ВОЛНОВОЙ ХАРАКТЕР ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА В СЕТЯХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

При использовании силовых линий электропередачи в составе канала связи в принципе отсутствует возможность согласования параметров линии с нагрузкой, вследствие чего имеет место сложный характер взаимосвязи между качеством связи, частотой несущего колебания и длиной линии.

Для проведения анализа процессов, связанных с распространением сигнала в канале связи по распределительным силовым сетям (РСС) на рис. 1 приведена функциональная схема фрагмента канала связи. Здесь Л1 и Л2 связанные между собой участки линии электропередачи, представленные в виде четырехполюсников. Z_{h1} , Z_{h2} и Z_{h3} – комплексные сопротивления нагрузки, подключенные в соответствующих точках РСС. U_1, I_1, U_2, I_2 , – комплексные амплитуды напряжений и токов на входе и выходе Л1 соответственно.

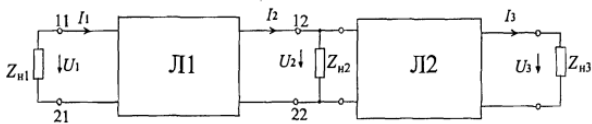


Рис. 1 – Функциональная схема участка линии связи

Распространение электромагнитной волны вдоль однородной многопроводной линии описывается телеграфными уравнениями. Рассмотрим однопроводную линию, эквивалентная схема элементарного участка которой приведена на рис. 2, (данная схема является эквивалентной и для элементарного участка двухпроводной линии без земли) [1].

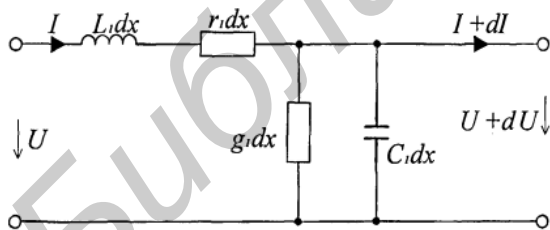


Рис. 2 – Эквивалентная схема элементарного участка однопроводной линии

Для синусоидальных токов и напряжений решение телеграфных уравнений для отрезка однопроводной линии с постоянными параметрами позволяют отобразить соотношение между комплексными амплитудами токов и напряжений на концах участка цепи следующим образом [2, 3]:

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} \gamma l + I_2 Z_{sh} \gamma l, \quad (1)$$

где: l – длина отрезка линии электропередачи;

$\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1}$ – коэффициент распространения;
 $Z_B = \sqrt{Z_1 / Y_1}$ – волновое сопротивление линии;
 $Z_1 = r_1 + j\omega L_1, Y_1 = g_1 + j\omega C_1$ – погонное сопротивление и погонная проводимость линии.

Уравнение (1) позволяет определить передаточную функцию отрезка линии по напряжению. Для этого установим связь между током I_2 напряжением U_2 и параметрами цепи следующим образом:

$$I_2 = U_2 \left(\frac{1}{Z_{h2}} + \frac{1}{Z_{Bx2}} \right), \quad (2)$$

где $Z_{Bx2} = R_{Bx2} + 1/j\omega C_{Bx2}$ – входное сопротивление отрезка линии Л2.

Подставив (2) в (1), после несложных преобразований получим выражение для передаточной функции по напряжению участка цепи Л1 в следующем виде:

$$K_u(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\operatorname{ch} \gamma l + \frac{Z_B}{Z_E} \operatorname{sh} \gamma l}, \quad (3)$$

в котором $1/Z_E = 1/Z_h + 1/Z_{Bx2}$

Из полученного выражения следует, что передаточная функция сложным образом зависит от произведения коэффициента распространения γ на длину отрезка l и от соотношения между волновым сопротивлением линии Z_B и эквивалентным сопротивлением нагрузки Z_E

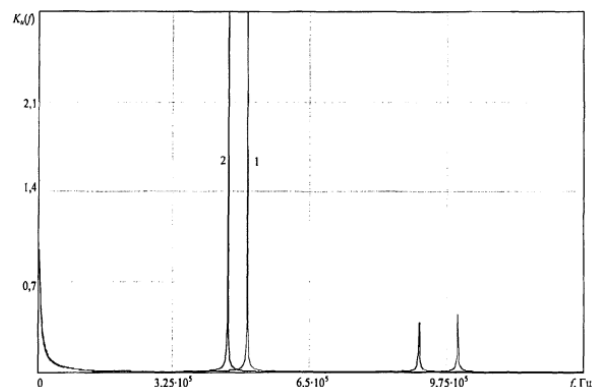


Рис. 3 – Амплитудно-частотные характеристики отрезка линии при различных значениях длины: 1- $l=100$ м; 2- $l=120$ м

На рис. 3 приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) отрезка линии с параметрами: $L_1 = 10^{-6}$ Гн/м; $r_1 = 10^{-3}$ Ом/м;

$C_1 = 10^{-10}$ Ф/м; $g_1 = 10^{-9}$ 1/ Ом·м при различных значениях длины отрезка. Параметры эквивалентного сопротивления нагрузки $Z_E = R_E + 1/j\omega C_E$ при этом $R_E = 2$ Ом; $C_E = 5 \cdot 10^{-7}$ Ф.

Из анализа выражения (3) следует, что АЧХ цепи периодически принимает экстремальное значение, причем величина каждого последующего экстремума, начиная со второго меньше предыдущего. Анализ полученного результата позволяет установить связь между значением частоты f_n , при которой имеет место экстремальная величина АЧХ и параметрами цепи в следующем виде:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \approx \frac{n}{2l\sqrt{L_1 C_1}}, (n = 1, 2, 3, \dots),$$

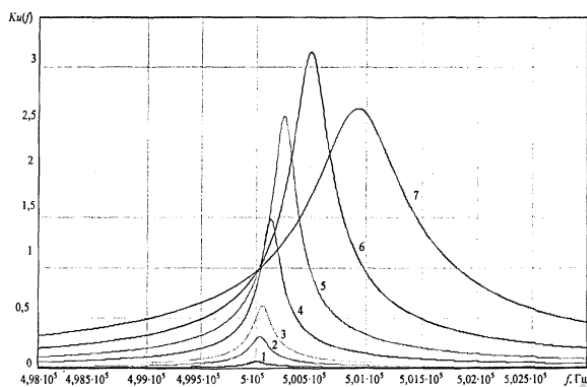


Рис. 4 – Амплитудно-частотные характеристики отрезка линии при $R_E = 2$ Ом и различных значениях эквивалентной емкости 1- $C_E = 10^{-4}$ Ф; 2- $C_E = 2 \cdot 10^{-5}$ Ф; 3- $C_E = 10^{-5}$ Ф; 4- $C_E = 4 \cdot 10^{-6}$ Ф; 5- $C_E = 2 \cdot 10^{-6}$ Ф; 6- $C_E = 10^{-6}$ Ф; 7- $C_E = 5 \cdot 10^{-7}$ Ф;

Анализ результата, представленного на рис. 4, приводит к выводу о том, что при заданном значении R_E увеличение емкости C_E сопровождается смещением максимального значения АЧХ на оси частот влево к величине $f_1 = 1/2l\sqrt{L_1 C_1}$. Причем при достаточно больших значениях C_E с увеличением емкости максимальная величина функции $K(f)$ стремится к нулю. Характерным является тот факт, что при значительном диапазоне изменения емкости C_E существует точка, общая для различных функций $K(f)$. Это означает, что на фиксированной частоте f_1 величина коэффициента передачи цепи практически не зависит от эквивалентной емкости нагрузки C_E (в некотором диапазоне ее изменения).

Отмеченные особенности наводят на мысль о том, что частота f_1 является наиболее благоприятной для выбора ее в качестве частоты несущего колебания при реализации приемопередающей

аппаратуры связи на данном отрезке линии электропередачи. Однако при этом необходимо принять во внимание два фактора. Первый из них связан с тем, что диапазон частот, в котором $K(f)$ изменяется в пределах 0,707 от наибольшего значения, составляет величину порядка 200 Гц. Это накладывает существенное ограничение на максимально допустимую скорость передачи информации в этом случае. Второй фактор связан с влиянием параметров отрезка линии Л2 на значение эквивалентной емкости C_E и эквивалентного сопротивления R_E . Расчеты показывают, что на частоте f_1 шунтирующее действие отрезка Л2 является максимально возможным, в результате чего значение передаточной функции отрезка Л1 на указанной частоте равно нулю. Поэтому при использовании узкополосных сигналов для организации связи этот факт нужно учитывать при выборе частоты несущего колебания.

После анализа зависимости параметров входного сопротивления отрезка линии от частоты выявлено, что наиболее приемлемым в данном случае является диапазон частот в пределах от $0,1 f_1$ до $0,9 f_1$ для выбора частоты несущего колебания. В указанном диапазоне частот и передаточная функция имеет достаточно высокое значение, и шунтирующее действие соседнего участка линии электропередачи невелико. Характерно, что в диапазоне частот $0,6 f_1 < f_1 < f_1$ с увеличением частоты возрастает и значение АЧХ цепи. Необходимо отметить, что чем сильнее разветвлена РСС, тем труднее осуществить выбор такой частоты, при которой ни один из отрезков силовой сети не оказывал бы подобного шунтирующего действия.

В данной ситуации целесообразно для организации связи использовать широкополосные (шумоподобные) сигналы. При этом, поскольку шунтирующее действие проявляется в узкой полосе частот, оно практически не оказывает "разрушающего" действия на сигнал. Причем чем шире полоса частот, занимаемая шумоподобным сигналом, тем меньше влияние на качество связи, шунтирующего действия соседнего участка линии электропередачи.

1. Микуцкий Г. В., Скитальцев В. С. Высокочастотная связь по линиям электропередачи. – М.: Энергия, 1969. – 447 с.
2. Гроднев И. И., Верник С. М., Кочановский Л. Н.; под ред. Л. Н. Кочановского. Линии связи : Учебник для вузов, – 6 изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь. 1995. – 488 с.
3. Попов В. П. Основы теории цепей: Учебник для вузов спец. "Радиотехника". – М.: Высш. шк., 1985. – 496 с.

Егоров Андрей Дмитриевич, аспирант кафедры систем управления БГУИР, A.D.Yegorov@gmail.com.

Научный руководитель: Шиллин Леонид Юрьевич, декан факультета информационных технологий и управления БГУИР, доктор технических наук, профессор, dekfitu@bsuir.by.