ВЛИЯНИЕ ИЗОЛЯТОРОВ НА ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Г. Н. Зражевский

В настоящее время силовые линии, линии электропередачи, а также контактные сети электротяги в ряде случаев уплотняются высокочастотными каналами связи, автоматики и телемеханики. Расчет таких каналов встречает ряд трудностей вследствие недостаточно разработанной теории распространения электромагнитной энергии высокой частоты по силовым проводным линиям.

Во многих работах, например, в [1, 2], рассмотрены общие вопросы, связанные с расчетом высокочастотных параметров линий электропередачи. В [3] приводится приближенный практически оправдываемый учет влияния емкости изоляторов на параметры линии в диапазоне частот до 150 *кгц*.

При расширении диапазона частот, используемых для уплотнения силовых линий, необходимо более точно учитывать влияние изоляторов на условия распространения высокочастотной энергии. Это особенно важно в тех случаях, когда отдельные провода, например, контактной сети электротяги, используются для канализации по ним высокочастотной энергии в диапазоне радиочастот. Так, в поездной радиосвязи на железнодорожном транспорте используются частоты в диапазоне 2,1 ÷ 2,6 *мгц*.

В настоящей работе, основанной на известных положениях теории проводных цепей и четырехполюсников, главное внимание уделено рассмотрению методики учета влияния изоляторов на параметры двухпроводных симметричных линий. При этом земля принимается плоской с конечной проводимостью.

В общем виде процесс распространения электромагнитной энергии по двухпроводной линии, расположенной над землей, описывается системой уравнений:

$$-\frac{dU_1}{dx} = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2; \qquad \frac{dU_2}{dx} = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2. \tag{1}$$

$$-\frac{dI_1}{dx} = Y_{11}U_1 - Y_{12}U_2; \qquad -\frac{dI_2}{dx} = -Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2. \tag{2}$$

Для линии, симметричной относительно земли, выполняются условия

$$Z_{11} = Z_{22} = Z_1;$$
$$Z_{21} = Z_{12} = Z_2.$$

Собственное сопротивление цепи одного провода над землей с конечной проводимостью

$$Z_1 = r_п + j\omega L_1 + 4\omega (P + jQ)\, 10^{-4}\ ом/км. \tag{3}$$

При этом поверхностное сопротивление каждого провода на частоте f *гц*

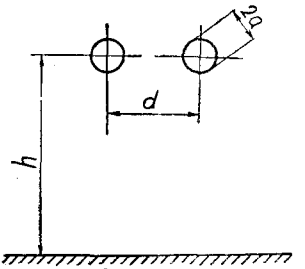
$$r_п = \frac{0{,}637}{2a} 10^{-3} \sqrt{\frac{f\mu r}{\sigma}}\ ом/км, \tag{4}$$

где σ, μ_r — соответственно удельная проводимость в *сим/м* и относительная магнитная проницаемость материала провода;

L_1 — внешняя индуктивность при допущении, что земля имеет бесконечную проводимость.

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{a} \text{ гн/км}, \tag{5}$$

где $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-4}$ *гн/км*; h — средняя высота подвеса (рис. 1); a — радиус провода; значения P и Q находятся из графиков Карсона или по формулам[1], приведенным, например, в [5]. Они определяют величину активного и реактивного сопротивлений вследствие конечной проводимости земли.



Взаимное сопротивление, обусловленное взаимной индуктивностью M:

$$Z_2 = j\omega M + 4\omega (P' + jQ') \cdot 10^{-4} \text{ ом/км}, \tag{6}$$

где

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d}; \tag{7}$$

M — взаимная индукция между цепями провод — земля при допущении бесконечной проводимости земли;

d — расстояние между проводами.

При выполнении условия $d \ll 2h$, что практически часто имеет место, выполняется равенство



Рис. 1.

$$P' = P, \qquad Q' = Q$$

и, следовательно,

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{d}. \tag{8}$$

В уравнениях (2) для симметричной системы

$$Y_{11} = Y_{22} = Y_1,$$
$$Y_{12} = Y_{21} = Y_2,$$

где Y_1 и Y_2 соответственно частичные собственная и взаимная проводимости, выражаемые через потенциальные коэффициенты зависимостью

$$Y_1 = j\omega C_1 = j\omega \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{11}^2 - \alpha_{12}^2};$$

$$Y_2 = j\omega C_2 = j\omega \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}^2 - \alpha_{12}^2}.$$

[1] Значения аргументов функций P и Q вычисляются по формулам

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}R} - \frac{1}{R^2} + \ldots;$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}R} - \frac{1}{\sqrt{2}R^3} + \ldots;$$

$$R = 0{,}279 \cdot 2h\sqrt{0{,}1 f \sigma_3}$$

где f — частота, *гц*; σ_3 — удельная проводимость земли, *сим/м*.

Потенциальные коэффициенты равны:

$$\alpha_{11} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{2h}{a}, \quad \alpha_{12} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{2h}{d}, \tag{9}$$

где $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^6}$ *ф/км*.

Если оба провода возбуждены от одного источника (рис. 2), то при их симметрии $u_1 = u_2 = u$, а сумма токов равна общему току волны, т. е.

$$I_1 = I_2, \quad I_1 + I_2 = I.$$

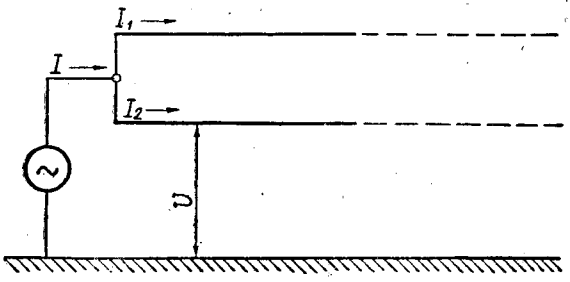


Рис. 2.

Решив при этих условиях систему уравнений (1) и (2), найдем вторичные параметры двух параллельно расположенных проводов — волновое сопротивление Z_c' и постоянную передачи γ':

$$Z_c' = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_1 + Z_2}{Y_1 - Y_2}}; \tag{10}$$

$$\gamma' = \sqrt{(Z_1 + Z_2)(Y_1 - Y_2)}. \tag{11}$$

Для линии передачи при высокой частоте справедливо неравенство

$$r_п + 8P \cdot 10^{-4} \ll \omega (L + M) + 8Q \cdot 10^{-4}.$$

Пренебрегая в выражении (10) активным сопротивлением, после преобразования получаем следующую формулу для расчета волнового сопротивления:

$$Z_c = 60 \ln \frac{2h}{\sqrt{ad}}. \tag{12}$$

Методом, известным в теории проводных цепей [6], при высокой частоте выражение (11) преобразуется в более простую расчетную формулу:

$$\gamma' = \frac{r}{2Z_c'} + j\omega\sqrt{LC}, \tag{13}$$

где

$$r = \frac{1}{2}(r_п + 8\omega P \cdot 10^{-4});$$

$$L = \frac{1}{2}(L_1 + M) + 4Q10^{-4}; \tag{14}$$

$$C = 2(C_1 + C_2) = \frac{2}{\alpha_{11} + \alpha_{12}}.$$

Перейдем к учету влияния изоляторов. Каждый изолятор на линии представляет собой сосредоточенную активноемкостную нагрузку.

Рассматриваемую двухпроводную линию представим как одиночный эквивалентный провод с равномерно распределенной нагрузкой в виде спаренных изоляторов с полным сопротивлением $Z_и$.

Расстояние между точками подключения такой нагрузки равно расстоянию между соседними опорами $\frac{l}{n}$, где n — число пролетов на участке длиной l.

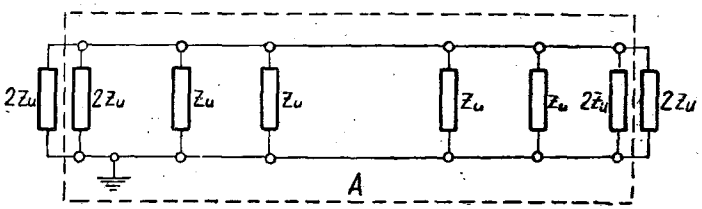


Рис. 3.

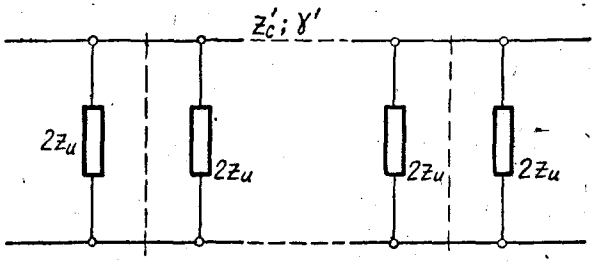


Рис. 4.

Для определения вторичных параметров эту цепь представим в виде четырехполюсника A, нагруженного слева и справа на сопротивления $2Z_и$ (рис. 3). В свою очередь четырехполюсник A представим в виде каскадного соединения n одинаковых простых четырехполюсников (рис. 4). Этот простой четырехполюсник состоит из трех каскадно соединенных элементарных четырехполюсников, результирующая матрица a которого запишется в виде [4]:

$$\|a\| = \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2Z_и} & 1 \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} \operatorname{ch}\gamma'\frac{l}{n} & Z'_c \operatorname{sh}\gamma'\frac{l}{n} \\ \frac{1}{Z'_c}\operatorname{sh}\gamma'\frac{l}{n} & \operatorname{ch}\gamma'\frac{l}{n} \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2Z_и} & 1 \end{matrix} \right\| =$$

$$= \left\| \begin{matrix} \operatorname{ch}\gamma'\frac{l}{n} + \rho \operatorname{sh}\gamma'\frac{l}{n} & Z'_c \operatorname{sh}\gamma'\frac{l}{n} \\ \frac{1}{Z'_c}(1+\rho^2)\operatorname{sh}\gamma'\frac{l}{n} + 2\rho \operatorname{ch}\gamma'\frac{l}{n} & \operatorname{ch}\gamma'\frac{l}{n} + \rho \operatorname{sh}\gamma'\frac{l}{n} \end{matrix} \right\|, \qquad (15)$$

где $\rho = \frac{Z'_c}{2Z_и}$.

В соответствии с известными формулами [4], связывающими характеристические параметры четырехполюсника с его коэффициентами, най-

дем эквивалентное волновое сопротивление Z_c и постоянную передачи g_i:

$$Z_c = Z'_c \sqrt{\frac{\operatorname{sh}\gamma' \frac{l}{n}}{(1+\rho^2)\operatorname{sh}\gamma' \frac{l}{n} + 2\rho \operatorname{ch}\gamma' \frac{l}{n}}}, \tag{16}$$

$$\operatorname{ch} g_i = \operatorname{ch}\gamma' \frac{l}{n} + \rho \operatorname{sh}\gamma' \frac{l}{n}.$$

Выводя обозначение $\rho = \operatorname{th}\delta$, после преобразований получим

$$\operatorname{ch} g_i = \frac{1}{\operatorname{ch}\delta} \operatorname{ch}\left(\gamma' \frac{l}{n} + \delta\right), \tag{17}$$

где

$$\delta = ar\operatorname{th}\rho = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{Z'_c + 2Z_и}{2Z_и - Z'_c} \right|.$$

В зависимости от конкретных условий выражения (16) и (17) для инженерных расчетов могут быть несколько упрощены.

В выражении $\gamma' \frac{l}{n} = \frac{l}{n}(\alpha' + j\beta)$ при высоких частотах обычно выполняется условие

$$\alpha' \ll \beta.$$

Тогда можно положить

$$\operatorname{sh}\gamma' \frac{l}{n} \sim \operatorname{sh} j\beta' \frac{l}{n} = j \sin\beta' \frac{l}{n},$$

$$\operatorname{ch}\gamma' \frac{l}{n} \simeq \cos\beta' \frac{l}{n}$$

и, следовательно,

$$Z_c = Z'_c \sqrt{\frac{j \sin\beta' \frac{l}{n}}{(1+\rho^2) j \sin\beta' \frac{l}{n} + 2\rho \cos\beta' \frac{l}{n}}}. \tag{18}$$

Так как $|2Z_и| \gg |Z'_c|$, то в выражении (17) допустимо принять

$$\operatorname{ch}\delta \simeq 1.$$

Тогда

$$g_i = \gamma' \frac{l}{n} + \delta. \tag{19}$$

Собственная постоянная передачи четырехполюсника A, составленного из каскадного включения согласованных четырехполюсников a, равна [4]:

$$g_A = \sum_{i=1}^{i=n} g_i = \gamma' l + n\delta. \tag{20}$$

Учитывая, что в линии число опор на единицу больше числа пролетов, имеем

$$g = \gamma' l + (n+1)\delta. \tag{21}$$

Из (21) следует, что дополнительное собственное затухание, вызванное изоляторами, равно $(n+1)\delta$.

Погонная постоянная передачи

$$\gamma = \frac{g}{l} = \gamma' + \frac{n+1}{l}\delta. \tag{22}$$

По данным измерения на частоте 2,5 *мгц* изолятор типа П-4,5, находящийся в эксплуатации, имеет *следующие* средние значения:

активное сопротивление 14 *ком*,

емкость — 35 *пф*.

Для двухпроводной линии для числа опор 16 на один километр дополнительное затухание за счет изоляторов составляет 0,4 *неп/км*; а волновое сопротивление уменьшается от 336 до 214 *ом*, т. е. на 36,3%. При этом фазовая скорость волны «фаза — земля» уменьшается на 5%.

При подключении генератора к симметричной двухпроводной линии по схеме «фаза — фаза» для определения высокочастотных параметров с учетом влияния изоляторов можно воспользоваться полученными результатами. Тогда при расчете волнового сопротивления по формулам (16) или (18) и постоянной передачи по формулам (17) или (22) взамен вышеприведенных формул для $\dot{Z}_c'$ и γ' следует воспользоваться подобными выражениями для междуфазовой волны, приведенными, например, в [6].

Необходимо также иметь в виду, что в этом случае под полным сопротивлением $Z_и$ понимается полное сопротивление двух последовательно соединенных изоляторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. В. Костенко, В. В. Сидельников, В. И. Орлов. Параметры каналов высокочастотной связи по воздушным и кабельным линиям электропередачи. Сб. работ по электромеханике. АН СССР, вып. V, 1961.

2. М. В. Костенко. Распространение синусоидальных электромагнитных волн в симметричной линии. Изв. вузов, «Энергетика», 1960, № 10.

3. А. А. Ильин. Параметры передачи контактной сети электрического транспорта в диапазоне частот до 150 *кгц*. «Электросвязь», 1963, № 9.

4. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейных электрических схем. АН СССР, 1951.

5. Инструкция по измерениям и расчету высокочастотных параметров линий электропередачи. Госэнергоиздат, 1953.

6. М. Я. Каллер. Теория электрических цепей. Гострансжелдориздат, 1956.