

ВОЛНОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ХАРАКТЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ЦЕПЕЙ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

К. К. Абрамов

Киев

В кабельных линиях связи помимо основных цепей существуют характерные сложные цепи. Изучение их параметров передачи представляет практический интерес для организации новых, более надежных телемеханических каналов связи и для разработки новых методов борьбы с взаимным влиянием.

Методика определения схем сложных цепей рассматривалась рядом авторов. Более детально вопрос изложен Клейном [1]*, предложившим разделять линию на цепи по конструктивным соображениям. Следуя его методике, для одной линии можно получить несколько вариантов сложных цепей.

Электромагнитная энергия распространяется по многопроводным линиям с потерями в виде суммы парциальных волн. Каждая волна движется со своей скоростью (со своим коэффициентом распространения γ) и по своей характерной цепи, т. е. для одной волны между напряжениями и токами проводов существуют свои строгие соотношения:

$$I_1 = q_1 I_0, \quad I_2 = q_2 I_0 \dots I_m = q_m I_0, \quad (1)$$

где I_0 — некоторый общий ток, а $I_1, I_2 \dots I_m$ — коэффициенты, зависящие от конструктивных особенностей линии и вида парциальной волны.

Цель работы — определить коэффициенты распространения и волновые сопротивления характерных цепей.

Воспользуемся системой телеграфных уравнений. Вторую половину системы для удобства запишем через потенциальные коэффициенты:

$$\begin{aligned} -\frac{dU_1}{dx} &= z_{11}I_1 + \dots z_{1m}I_m, \quad -U_1 = K_{11}\frac{dI_1}{dx} + \dots K_{1m}\frac{dI_m}{dx} \\ -\frac{dU_m}{dx} &= z_{m1}I_1 + \dots z_{mm}I_m, \quad -U_m = K_{m1}\frac{dI_1}{dx} + \dots K_{mm}\frac{dI_m}{dx}, \end{aligned} \quad (2)$$

где z_{kk} , z_{ki} — полные собственные и взаимные сопротивления проводов, K_{kk} , K_{ki} — соответствующие комплексные потенциальные коэффициенты.

Исключив напряжения при условии, что $\frac{d}{dx} = -\gamma$, получим однородную систему алгебраических уравнений, которая устанавливает связь между токами проводов:

[illegible]

* В. Клейн. Теория взаимного влияния в линиях связи. Изд-во иностр. лит., 1959.

Поскольку решения системы (3) отличные от нуля возможны только при равенстве нулю ее определителя:

$$\Delta = \begin{vmatrix} (z_{11} - \gamma^2 K_{11}) & \dots & (z_{1m} - \gamma^2 K_{1m}) \\ \dots & \dots & \dots \\ (z_{m1} - \gamma^2 K_{m1}) & \dots & (z_{mm} - \gamma^2 K_{mm}) \end{vmatrix} = 0, \quad (4)$$

то (4) — характеристическое уравнение, из которого находятся все возможные значения γ для данной линии.

После того как будет определен некоторый коэффициент распространения, из системы (3) можно будет найти соотношения между токами и таким образом установить конфигурацию одной из характерных цепей.

Волновое сопротивление каждой однопроводной цепи находится как отношение напряжения цепи бегущей волны к току:

$$z_{kc} = \frac{U_k}{I_k} = \frac{q_{1/qk} z_{1k} + q_{2/qk} z_{2k} + \dots z_k + \dots q_{m/qk} z_m}{\gamma}. \quad (5)$$

Всего m — проводная линия имеет m^2 волновых сопротивлений.

Однопарный и одночетверочный кабель. Ввиду симметрии частичные параметры в одночетверочном кабеле находятся в следующих соотношениях:

$$z_{11} = z_{22} = z_{33} = z_{44}, \quad z_{12} = z_{34}, \quad z_{13} = z_{14} = z_{23} = z_{24} \quad \text{и т. д.},$$

а характеристическое уравнение имеет такие корни:

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \sqrt{\frac{z_{11} - z_{12}}{K_{11} - K_{12}}}, \quad \gamma_3 = \sqrt{\frac{z_{11} + z_{12} - 2z_{13}}{K_{11} + K_{12} - 2K_{13}}}, \\ \gamma_4 = \sqrt{\frac{z_{11} + z_{12} + 2z_{13}}{K_{11} + K_{12} + 2K_{13}}}. \quad (6)$$

Чтобы определить взаимосвязь между токами, подставим поочередно найденные значения γ_1 , γ_2 , γ_3 и γ_4 в (3).

Если распространяется волна с коэффициентом γ (для краткости далее ее будем называть волна γ_1), то $I_1 = -I_2$ или $I_3 = -I_4$. В обоих случаях I_1 и I_3 независимы. Из этого ясно, что волны γ_1 и γ_2 распространяются по основным цепям четверки.

Для волны γ_3 , $I_1 = I_2 = -I_3 = -I_4 = 0,5I_0$, следовательно, γ распространяется по фантомной цепи.

Наконец, для волны γ_4 находим $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 0,25I_0$. Ток во всех проводах четверки протекает в одном направлении — это значит, что данная волна распространяется по несимметричной (суперпикаровской) цепи. Так как продольное сопротивление и потенциальный коэффициент цепи равны:

$$z_{II} = \frac{z_{11} + z_{12} + 2z_{13}}{4}, \quad K_{II} = \frac{K_{11} + K_{12} + 2K_{13}}{4}, \quad (7)$$

то четверка в целом составляет один сложный провод.

В однопарном кабеле имеется только основная и пикаровская цепь, поэтому сложный провод характеризуется частичными параметрами:

$$z_{II} = \frac{z_{11} + z_{12}}{2}, \quad K_{II} = \frac{K_{11} + K_{12}}{2}. \quad (8)$$

Кабель из трех элементарных групп. Цепи каждой элементарной группы при парной или четверочной скрутке — характерные. Они известны, поэтому далее будем рассматривать только сложные цепи, в которых элементарные группы ведут себя как одиночные проводники более

сложной конструкции. Для обозначения частичных параметров сложных проводников используем римские цифры.

В кабеле из трех групп существуют два типа парциальных волн с коэффициентами:

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \sqrt{\frac{z_{1I} - z_{1II}}{K_{1I} - K_{1II}}}, \quad \gamma_3 = \sqrt{\frac{z_{1I} + 2z_{1II}}{K_{1I} + 2K_{1II}}}. \quad (9)$$

В первом случае получаем

$$I_I - I_{II}, I_{III} = 0.$$

Однако могут существовать и другие варианты:

$$I_{II} = -I_{III}, I_I = 0 \text{ и } I_I = -I_{III}, I_{II} = 0.$$

Если эти варианты существуют одновременно (накладываются), то ни в одном из сложных проводов ток не равен нулю; между ними устанавливается связь

$$I_I + I_{II} + I_{III} = 0. \quad (10)$$

В частности, случай $I_{II} = I_I e^{i\frac{\pi}{3}}$, $I_{III} = I_I e^{i\frac{2\pi}{3}}$ соответствует трехфазной передаче электромагнитной энергии.

Волновые сопротивления проводов — групп

$$z_{cI}^{(1)} = z_{cII}^{(1)} = z_{cIII}^{(1)} = \sqrt{(z_{1I} - z_{1II})(K_{1I} - K_{1II})} \quad (11)$$

образуют звезду.

Распространение волны γ_3 происходит по несимметричной цепи. Токи в проводах — группах равны по величине и направлению.

$$I_I = I_{II} = I_{III} = \frac{1}{3} I_0, \quad (12)$$

поэтому сердечник кабеля эквивалентен одиночному проводу еще более сложной конструкции. Запишем его частичные параметры:

$$z_{\text{серд}} = \frac{z_{1I} + 2z_{1II}}{3}, \quad K_{\text{серд}} = \frac{K_{1I} + 2K_{1II}}{3}. \quad (13)$$

Рассмотренные сложные цепи образуются не только в кабелях из трех групп, но и в центральных сердечниках многоповивных кабелей, если сердечник состоит из трех групп.

Кабель из четырех элементарных групп. Конструктивно группы в таком кабеле располагаются под оболочкой как провода в одночетверочном кабеле, поэтому сложные цепи аналогичны двум основным: искусственной и несимметричной цепи четверки. Отличие формул для расчета волновых параметров от (6) лишь в том, что подставляются частичные параметры сложных проводников. Формально арабские индексы в формулах для частичных параметров должны быть заменены на римские цифры. При этом волновые сопротивления цепей рассчитываются формулами

$$\begin{aligned} z_c^{(1)} &= z_c^{(2)} = 2\sqrt{(z_{1I} - z_{1II})(K_{1I} - K_{1II})}, \\ z_c^{(3)} &= \sqrt{(z_{1I} + z_{1II} - 2z_{1III})(K_{1I} + K_{1II} - 2K_{1III})}, \\ z_c^{(4)} &= \frac{1}{4}\sqrt{(z_{1I} + z_{1II} + 2z_{1III})(K_{1I} + K_{1II} + 2K_{1III})}. \end{aligned} \quad (14)$$

Кабель из семи элементарных групп. Рассмотрим двухповивный кабель; центральный повив состоит из одной группы, а второй (он же

и наружный) — из шести групп, рис. 1, в. При изготовлении кабеля повивы скручиваются со своим шагом, поэтому

$$z_{II II} = z_{III III} = \dots z_{VII VII}, \quad z_{I II} = z_{I III} = \dots z_{I VII}, \quad z_{II III} = \\ = z_{III IV} = \dots z_{VI VII} \text{ и т. д.,}$$

где первым считается центральный сложный проводник.

Если в наружном повиве образуется симметричная цепь, то центральный сложный проводник окажется на линии нулевого потенциала и в состав такой цепи не войдет. Поэтому симметричные цепи повива можно определять, решая характеристические уравнения применительно линии из шести проводников, расположенных кольцом.

Пять корней уравнения определяют коэффициенты распространения и конфигурацию пяти симметричных цепей

$$\begin{aligned} \gamma_1 = \gamma_2 &= \sqrt{\frac{z_{II II} - z_{II III} - z_{II IV} + z_{II V}}{K_{II II} - K_{II III} - K_{II IV} + K_{II V}}}, \\ \gamma_3 &= \sqrt{\frac{z_{II II} - 2z_{II III} + 2z_{II IV} - z_{II V}}{K_{II II} - 2K_{II III} + 2K_{II IV} - K_{II V}}}, \\ \gamma_4 = \gamma_5 &= \sqrt{\frac{z_{II II} + z_{II III} - z_{II IV} - z_{II V}}{K_{II II} + K_{II III} - K_{II IV} - K_{II V}}}, \end{aligned} \quad (15)$$

а шестой — несимметричной цепи. Все кольцо образует сложный проводник с частичными параметрами

$$z_k = \frac{z_{II II} + 2z_{II III} + 2z_{II IV} + z_{II V}}{6}, \quad K_k = \frac{K_{II II} + 2K_{II III} + 2K_{II IV} + K_{II V}}{6}. \quad (16)$$

У кабеля из семи групп наружный повив с центральным связан электрической и магнитной связью. Совместно они образуют двухпроводную несимметричную линию, распадающуюся на две несимметричные характерные цепи.

Точные значения γ этих цепей громоздки. Для области высоких частот можно принять

$$\frac{z_k}{K_k} \approx \frac{K_{II}}{K_k}, \quad (17)$$

тогда

$$\frac{I_1}{I_k} \approx \pm \sqrt{\frac{K_k}{K_{II}}}, \quad (18)$$

а поэтому

$$\gamma_{6,7}^2 = \frac{z_{II} \pm z_{Ik} \sqrt{\frac{K_{II}}{K_k}}}{K_{II} \pm K_{Ik} \sqrt{\frac{K_{II}}{K_k}}},$$

$$z_c^{(k)} = \sqrt{(z_k \pm z_{Ik} \sqrt{K_k/K_{II}})(K_k \pm K_{Ik} \sqrt{K_k/K_{II}})}, \quad (19)$$

$$z_c^{(I)} = \sqrt{(z_{II} \pm z_{Ik} \sqrt{K_{II}/K_k})(K_{II} \pm K_{Ik} \sqrt{K_{II}/K_k})}.$$

В кабелях с большим числом повивов образование цепей происходит аналогично. Симметричные цепи разных повивов связаны между собой

очень слабо, поэтому коэффициенты распространения и конфигурации характерных цепей можно определить для каждого повива в отдельности.

Кроме внутрививных цепей, в кабелях образуются несимметричные цепи, в которых каждый повив ведет себя как одиночный провод.

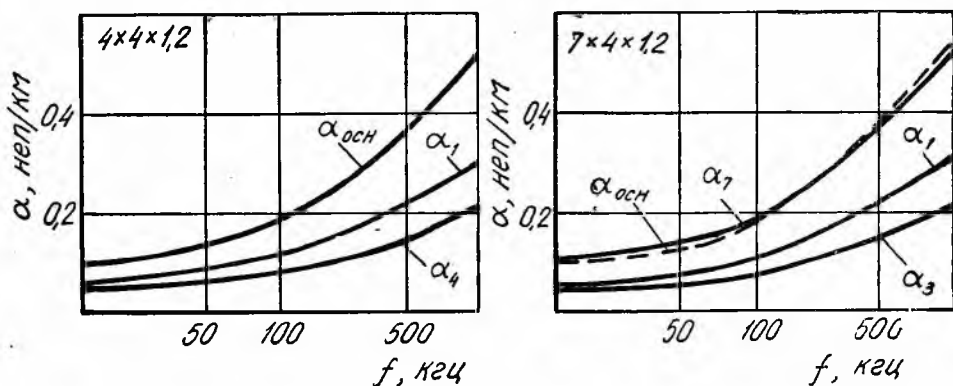


Рис. 2.

Интересно сравнить коэффициенты затухания и волновые сопротивления различных сложных цепей. Из рис. 2 видно, что коэффициенты затухания α зависят от типа кабеля и конфигурации сложной цепи. Большое значение имеют симметричные цепи. Характеристики их коэффициентов затухания расположенные на графике почти в два раза ниже, чем коэффициент затухания основной цепи. Объясняется это меньшей величиной активного сопротивления сложных проводов, которое снижается по сравнению с основными за счет увеличения их общего поперечного сечения. Коэффициенты затухания сложных несимметричных цепей незначительно отличаются от $\alpha_{осн}$.

Волновые сопротивления цепей, ом

1×4×1,2		4×4×1,2			7×4×1,2				
$z_c^{(1)}$	$z_c^{(4)}$	$z_c^{(1)}$	$z_c^{(3)}$	$z_c^{(4)}$	$z_c^{(1)}$	$z_c^{(3)}$	$z_c^{(4)}$	$z_c^{(6)}$	$z_c^{(7)}$
160	47	136	58	37	52	35	81	26	10

Волновые сопротивления сложных цепей мало изменяются с частотой, поэтому в таблицу сведены только средние значения. Порядок волнового сопротивления симметричных цепей такой же, что и в основных. Волновые же сопротивления несимметричных цепей значительно меньше. Наиболее малые значения относятся к сложным цепям многоповивных кабелей и особенно, если токи повивов имеют встречные направления (α_c^7).

ВЫВОДЫ

1. Коэффициенты затухания сложных симметричных цепей в кабелях значительно меньше, чем основные. Это свойство можно использовать для организации телемеханических каналов связи.

2. При эксплуатации кабельных линий сложные цепи остаются ненагруженными. Таким образом, существует возможность повысить переходное затухание между цепями кабеля, уменьшив влияние за счет отражения от концов сложных цепей.

3. Деление кабельных линий на характерные цепи дает возможность более глубоко проследить за процессами распространения по ним электромагнитных волн и оценить все причины взаимного влияния.