

УДК 621.391+621.395

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФАНТОМНОЙ ЦЕПИ, ОБРАЗОВАННОЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАР ОДНОЧЕТВЕРОЧНОЙ МЕДНО-КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

В.И. КИРИЛЛОВ, И.Н. БЕЛЯНСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, 220013, Беларусь*

*Военная академия Республики Беларусь
Независимости, 220, Минск, 220057, Беларусь*

Поступила в редакцию 2 сентября 2013

Определены вторичные параметры фантомной цепи с применением методики математического анализа физических цепей. Получены частотные зависимости модуля волнового сопротивления и коэффициента затухания фантомной цепи.

Ключевые слова: фантомная цепь, волновое сопротивление, коэффициент затухания.

Введение

Постоянный рост объема информации, циркулирующей в сетях связи, требует повышения пропускной способности и эффективного использования частотного ресурса существующих линий связи.

При строительстве меднокабельных полевых линий связи, широко применяется четырехпроводный кабель П-296. При стандартных режимах организации передачи информации используются две физические пары кабеля, что накладывает ограничения на количество одновременно работающих цифровых систем передачи (ЦСП) информации и на длину участка регенерации. Для существенного увеличения пропускной способности одночетверочного кабеля был предложен ряд вариантов использования фантомной цепи (ФЦ) [1–5], которая ранее широко применялась исключительно для обеспечения дистанционного питания и служебной связи между регенераторами и оконечными пунктами [6].

Проведенные экспериментальные исследования ФЦ [7] показали, что характеристики передачи такой цепи близки к одноименным характеристикам физической пары и пригодны для обеспечения передачи цифровых сигналов в широкой полосе частот. Тем самым была подтверждена целесообразность и актуальность решений [1–5].

Однако при их практической реализации и, в частности, при реализации устройств, которые должны на приемной стороне корректировать неравномерность частотной характеристики затухания ФЦ, потребовались более точные знания о теоретических возможностях ФЦ в широкой полосе частот. Именно это послужило основанием для проведения данной работы. Ее основной задачей является определение эквивалентной схемы ФЦ и влияния на нее вторичных параметров основных цепей.

Методика расчета вторичных параметров фантомной цепи

Схема организации ФЦ на одночетверочном кабеле представлена на рис. 1. Токопроводящие жилы кабеля обозначены буквами *a*, *b*, *c*, *d*. Первая физическая пара

образована жилами a и b , вторая – жилами c и d соответственно. К первой физической паре подключены цифровые системы передачи ЦСП-1А и ЦСП-1Б, а ко второй – ЦСП-2А и ЦСП-2Б. Линейные трансформаторы Т1, Т2, Т3, Т4 являются дифференциальными. К средним точкам этих трансформаторов подключаются цифровые системы передачи ЦСП-3А и ЦСП-3Б. Таким образом, последние работают по ФЦ.

Применительно к устройствам, предложенным в [1–5], под цифровыми системами ЦСП-1–ЦСП-3 можно понимать, например, элементы одной общей ЦСП при разделении общего цифрового потока на три части. При этом скорости передачи для каждой части могут быть как равными, так и различными.

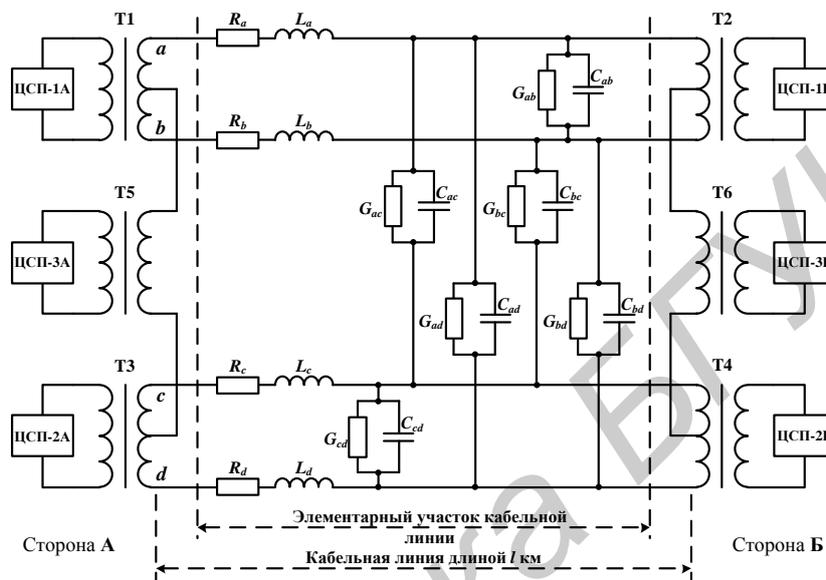


Рис. 1. Схема организации фантомной цепи для передачи цифровой информации

Попытки математического описания ФЦ предпринимались еще в 1-ой половине XX в. и для телефонных низкочастотных (НЧ) кабелей были определены основные параметры [8]. Однако в [8] приводятся конечные значения без объяснения способа их получения (аналитический или эмпирический), что не позволяет использовать их для современных кабелей связи, работающих в более широкой полосе частот (до десятков МГц). Кроме того, отсутствие аналитических выражений параметров ФЦ не позволяет провести полноценное моделирование цифровых систем передачи. При выполнении данной работы оказалось полезным применение методики математического анализа физических цепей, описанной в [9–10]. В частности, использовалась методика получения аналитических выражений для волнового сопротивления и коэффициента распространения ФЦ на основе первичных параметров физических цепей.

Напряжения и токи в длинной линии являются функциями времени t и координаты x , отсчитываемой от одного из концов линии. Для анализа распределения напряжения и тока для колебаний произвольной формы воспользуемся режимом установившихся гармонических колебаний, поскольку для этого режима заранее известен закон изменения напряжений и токов от времени в любом сечении линии [9–10].

Бесконечно малый отрезок длинной линии dx представляется в следующем виде, показанном на рис. 2. Исходными данными являются первичные параметры передачи: сопротивление цепи ($R = R_a + R_b$), индуктивность цепи ($L = L_a + L_b$), проводимость изоляции ($G = G_{ab}$), электрическая емкость цепи ($C = C_{ab}$). При этом под обозначениями U , I , dU , dI следует понимать комплексные величины. Взаимное расположение жил кабеля показано на рис. 3.

К элементарному отрезку длинной линии, представляющему собой четырехполюсник с сосредоточенными параметрами, можно применить законы Ома и Кирхгофа и составить систему дифференциальных уравнений (1):

$$\begin{cases} -\frac{dU}{dx} = I(R + j\omega L); \\ -\frac{dI}{dx} = U(G + j\omega C). \end{cases} \quad (1)$$

В результате решения системы (1) получается система уравнений передачи длинной линии (2):

$$\begin{cases} U = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x} \\ I = \frac{A_1}{Z_B} e^{-\gamma x} - \frac{A_2}{Z_B} e^{\gamma x}, \end{cases} \quad (2)$$

где A_1, A_2 – постоянные интегрирования, Z_B – волновое сопротивление, γ – коэффициент распространения ($\gamma = \alpha + j \cdot \beta$, где α – коэффициент затухания, а β – коэффициент фазы) [10].

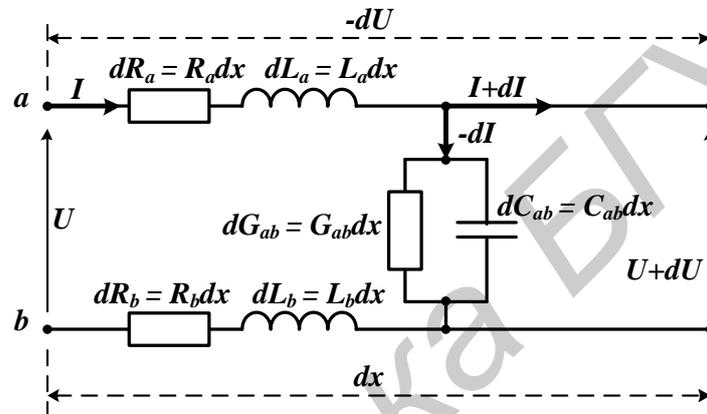


Рис. 2. Элементарный участок линии передачи

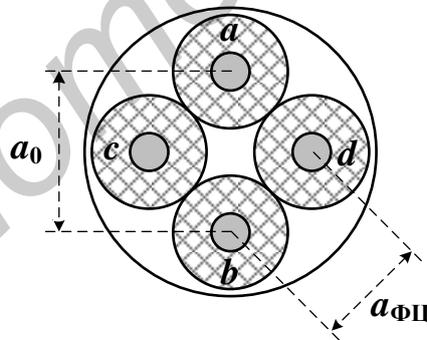


Рис. 3. Расстояние между жилами в сечении одночетверочного кабеля

На рис. 1 видно, что две физические пары a и b образуют первую жилу ФЦ, а физические жилы c и d – вторую жилу ФЦ. Поэтому для определения сопротивления и индуктивности элементарного участка dx одной жилы ФЦ в идеальном случае, когда $R_a = R_b = R_c = R_d$ и $L_a = L_b = L_c = L_d$, применим формулу параллельного соединения проводников физической пары:

$$dR_{ab} = \frac{dR_a \cdot dR_b}{dR_a + dR_b} = \frac{R_a dx}{2}, \quad dL_{ab} = \frac{dL_a \cdot dL_b}{dL_a + dL_b} = \frac{L_a dx}{2}, \quad (3)$$

$$dR_{cd} = \frac{dR_c \cdot dR_d}{dR_c + dR_d} = \frac{R_a dx}{2}, \quad dL_{cd} = \frac{dL_c \cdot dL_d}{dL_c + dL_d} = \frac{L_a dx}{2}, \quad (4)$$

а для определения последовательного комплексного сопротивления ФЦ в целом (с учетом второй пары) – формулу последовательного соединения:

$$dZ_{\text{ФЦ}} = dZ_{ab} + dZ_{cd} = dR_{ab} + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot dL_{ab} = \frac{1}{2}(R_a + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_a) dx + \frac{1}{2}(R_a + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_a) dx = (R_a + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_a) dx = \frac{R + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{2} dx \quad (5)$$

На рис. 1 также показаны проводимости изоляции между жилами a и c , a и d , b и c , b и d . Для определения комплексной проводимости между жилами ФЦ учтем особенности конструкции одночетверочного кабеля и то, что расстояние между физическими жилами в сечении кабеля равны: a_0 – расстояние между жилами одной физической пары; $a_{\text{ФЦ}} = a_0 / \sqrt{2}$ – расстояние между жилами разных физических пар (рис. 3). Следовательно, $Y_{ac} = \sqrt{2}(G_{ab} + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{ab})$.

Результирующая проводимость ФЦ будет определяться формулой:

$$Y_{\text{ФЦ}} = 2\sqrt{2}(G + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C). \quad (6)$$

Таким образом, выражения для волнового сопротивления и коэффициента распространения ФЦ имеют вид (7), (8):

$$Z_{\text{В-ФЦ}} = \sqrt{\frac{Z_{\text{ФЦ}}}{Y_{\text{ФЦ}}}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2}(R + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L)}{2\sqrt{2}(G + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)}} = \frac{Z_{\text{В}}}{2^4\sqrt{2}} \approx \frac{Z_{\text{В}}}{2,378}, \quad (7)$$

$$\gamma_{\text{ФЦ}} = \sqrt{Z_{\text{ФЦ}} \cdot Y_{\text{ФЦ}}} = \sqrt{\frac{1}{2}(R + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L) \cdot 2\sqrt{2}(G + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)} = \sqrt[4]{2} \cdot \gamma \approx 1,189 \cdot \gamma. \quad (8)$$

Как следует из (7), волновое сопротивление ФЦ примерно в 2,378 раз меньше, чем волновое сопротивление основной физической цепи, а из (8) видно, что коэффициент распространения γ (а, следовательно, и коэффициент километрического затухания, α) ФЦ примерно в 1,189 раз больше, чем для основной физической цепи.

Вторичные параметры линии связи существенно зависят от частоты передаваемого сигнала. На рис. 4 изображены частотные зависимости модулей волновых сопротивлений ФЦ ($|Z_{\text{В-ФЦ}}(f)|$) и основной цепи ($|Z_{\text{В-ОСН}}(f)|$), а на рис. 5 – частотные зависимости коэффициентов затухания ФЦ ($\alpha_{\text{ФЦ}}(f)$) и основной цепи ($\alpha_{\text{ОСН}}(f)$).

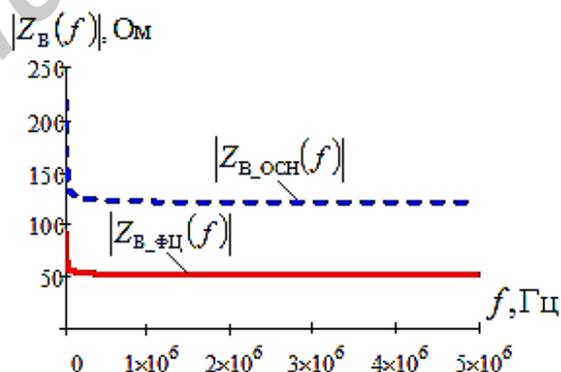


Рис. 4. Частотная зависимость модуля волнового сопротивления

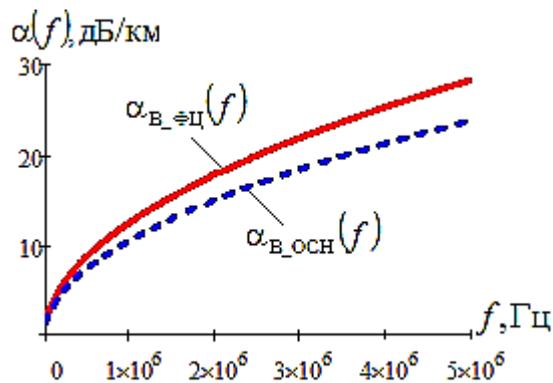


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента километрического затухания

Расчет проводился по формулам (7) и (8) применительно к кабелю П-296, первичные параметры которого R , L , C и G приведены в [11]. Сравнивая их с результатами измерений для этого кабеля, приведенными в [7], можно убедиться в хорошем совпадении.

Отличия вторичных параметров ФЦ от параметров физической линии предъявляло дополнительные требования к согласованию цифровых систем передачи, которые организуются по ФЦ.

Результаты расчета в основном подтверждают полученные ранее результаты экспериментальных измерений [7]. Однако в силу определенных трудностей при проведении эксперимента выводы, сделанные в работе [7], менее точные, чем получены в настоящей статье. В [7], например, утверждается, что эквивалентное волновое сопротивление ФЦ в 2,5 раза меньше, чем волновое сопротивление физической пары, а коэффициент километрического затухания ФЦ практически совпадает с коэффициентом километрического затухания основной пары.

Сравнивая эти данные с результатами, полученными в (7) и (8), видим, что относительная погрешность расчетов и эксперимента составляет порядка 4,9 % и 18,9 % для волнового сопротивления и коэффициента километрического затухания соответственно.

Заключение

Наиболее существенным является различие в оценке коэффициента километрического затухания ФЦ, что особенно важно при расчете предельно допустимой длины участка регенерации цифровой системы передачи при различных вариантах распределения общего цифрового потока между ЦСП-1÷ЦСП-3. Например, при расчетной длине участка регенерации, равной 10 км, реально допустимая длина окажется на 11,3 % короче. Соответственно, разница в расчете составит более 1 км, что существенно при практическом использовании предложенных вариантов ЦСП.

Полученные математические выражения для параметров ФЦ позволяют проводить более точные исследования возможности применения ФЦ для передачи цифровой информации в широкой полосе частот.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF THE FANTOM CIRCUIT, BASED ON PHYSICAL COUPLES THE ONE-QUADEDDED COPPER COMMUNICATION LINE

V.I. KIRILLOV, I.N. BELYANSKY

Abstract

Secondary parameters of a phantom circuit using a technique of the mathematical analysis of physical circuits are determined. The frequency dependences of the module of wave resistance and attenuation coefficient of a phantom circuit are received.

Список литературы

1. Кириллов В.И., Белко А.И., Дубин В.А., Соборова И.Г. Четырехпроводная цифровая система передачи / Патент РБ № 9206.
2. Кириллов В.И., Белко А.И., Дубин В.А., Соборова И.Г. Четырехпроводная цифровая система передачи / Патент РФ № 2260909.
3. Кириллов В.И., Белко А.И., Соборова И.Г. Цифровая система передачи для четырехпроводной линии связи / Патент РБ № 9401.
4. Кириллов В.И., Белко А.И., Соборова И.Г. Цифровая система передачи для четырехпроводной линии связи / Патент РФ № 2259014.
5. Кириллов В.И., Белко А.И., Соборова И.Г., Сухвал Ю.А., Савчук Н.Н. Устройство преобразования сигналов для четырехпроводной цифровой системы передачи / Патент РБ № 9225.
6. Кириллов В.И. Многоканальные системы передачи: учебник. М, 2003.
7. Кириллов В.И., Белко А.И., Малашкевич Д.Ф. // Веснік сувязі. 2003. № 3. С. 56–58.
8. Кулешов В.Н. Теория кабелей связи. М, 1950.
9. Улахович Д.А. Основы теории линейных электрических цепей: учеб. пособие. СПб, 2009.
10. Гроднев И.И., Верник С.М., Кочановский Л.Н. Линии связи. М, 1995.
11. Кабельно-линейные сооружения связи: учебник / Под общей ред. В.В. Кольцова. М, 1982.