

## Влияние коэффициента укрутки изолированных жил на параметры передачи симметричных кабелей связи

Скрутка жил в симметричном кабеле, как известно, влияет на параметры передачи его цепей. Чтобы учесть зависимость параметров от шага скрутки, рассчитанные рабочую электрическую емкость  $C$  и индуктивность  $L$  пар, скрученных с шагом  $h$ , традиционно умножают на коэффициент укрутки  $k_y$  (например [1]).

$$k_y = \sqrt{1 + (\pi \cdot d_1 / h)^2}, \quad (1)$$

где  $d_1$  – диаметр изолированной жилы. Такая поправка приемлема для кабелей, длина шагов скрутки в которых превышает 60–120 мм. В симметричных кабелях, предназначенных для передачи сигналов с частотами до 100 МГц и выше, применяют скрутку с малыми шагами  $h \approx (8-30)$  мм. Это необходимо для уменьшения взаимного влияния между цепями. Но, если применяются малые шаги, то обнаруживается, что зависимости параметров передачи от  $k_y$  иные. На рис. 1 приведены  $C$  и  $L$  пар с разными коэффициентами укрутки, полученные по результатам измерений емкостей и индуктивностей пар отдельно каждого из трех образцов LAN-кабелей парной скрутки разных изготовителей или разных партий.

При изменении  $k_y$  от 1 до 1,06 емкости по сравнению с емкостями нескрученных пар (жилы параллельны,  $k_y = 1$ ) возрастают на 10–20 %, а индуктивности – у одних образцов увеличиваются, а у других – уменьшаются. Это сравнение показывает, что при малых шагах зависимости  $C$  и  $L$  от  $k_y$  сложнее, чем просто увеличение параметров соответственно увеличению длины жил пары по сравнению с длиной кабеля и, очевидно, связано с другими причинами, а именно:

- а) с винтовой (спиральной) конфигурацией электрического и магнитного полей;
- б) с действием радиальных сил, деформирующих изоляцию жил и возрастающих с увеличением  $k_y$ ;
- в) с образованием плоского участка в месте прижатия друг к другу изоляции жил пары и увеличением его площади с увеличением силы прижатия изоляции, рис 2.

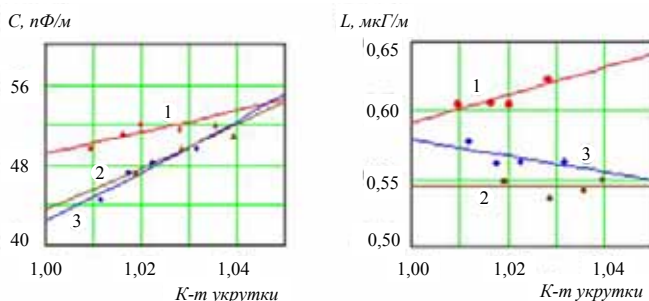


Рис. 1. Экспериментальные зависимости (точки) рабочих емкостей  $C$  и индуктивностей  $L$  цепей для трех образцов LAN-кабелей разных изготовителей или разных партий от коэффициента укрутки жил. Линии – зависимости, проведенные по точкам

Винтовой изгиб токопроводящих жил меняет форму электрического и магнитного полей с образованием продольных составляющих напряженностей  $E_z$  и  $H_z$ . Радиальные силы, прижимающие жилы к центру пары и деформирующие изоляцию, сближают токопроводящие жилы, что, как известно, должно приводить к увеличению рабочей емкости и уменьшению индуктивности рабочей пары кабеля. Увеличение площади плоского участка прижатия изоляции жил меняет картину электрического поля пары, увеличивает значение эквивалентной диэлектрической проницаемости, что, соответственно, увеличивает емкость пары. Следует заметить, что степень деформирования изоляции зависит от механических свойств применяемых материалов изоляции, а также от плотности изоляции – сплошная она или пористая.

Поперечное механическое давление на изоляцию жил определяется натяжением жил и зависит от угла скрутки, поэтому может меняться в зависимости не только от марки кабеля, но и от типа и настройки технологического оборудования у каждого изготовителя кабелей, а также от изменения режимов изготовления кабелей.

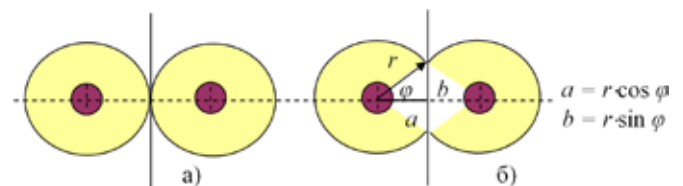


Рис. 2. Формы поперечных сечений изолированных жил пары а) идеальная, б) поперечно деформированная

Чтобы теоретически оценить зависимость параметров от  $k_y$ , когда изоляция не деформирована, была использована формула Г. Бухгольца [2, (6.87 а)], которая предназначена для приближенного расчета внешней индуктивности скрученной экранированной пары, ось которой и ось экрана совпадают. Формула [2 (6.87 а)] громоздкая, поэтому в статье не приводится. Она имеет вид бесконечного ряда, состоящего из математических выражений, содержащих модифицированные функции Бесселя первого и второго рода, порядок которых растет с увеличением номера члена суммы.

Для проверки самой формулы Г. Бухгольца на непротиворечивость известной формуле для внешней индуктивности экранированной пары с параллельными жилами и правильности ее использования автором были вычислены индуктивности скрученных экранированных пар с большими шагами скрутки ( $h > 100$  мм, как приближение к  $h \rightarrow \infty$ ) и индуктивности по формуле для экранированной пары с параллельными жилами ( $h \rightarrow \infty$ ), приводимой в учебниках по радиочастотным кабелям и кабелям связи

$$L_n = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left( \frac{2d_1 \cdot r_0^2 - a^2}{d_0 \cdot r_0^2 + a^2} \right), \quad (2)$$

где  $r_0$  – радиус экрана,  $d_0$  и  $d_1$  – диаметры токопроводящей и изолированной жилы, соответственно,  $a = d_1/2$ . При одинаковых диаметрах токопроводящих, изолированных жил и экрана кабелей и условии  $h \rightarrow \infty$  результаты расчетов по формуле Г. Бухгольца и по формуле (2) практически совпадают.

Далее, расчет показал, (рис. 3, кривая 2), что если коэффициент укрутки пар не выходит за пределы 1,00–1,06, то зависимость индуктивности от  $k_y$  можно аппроксимировать степенной функцией вида  $k_y^{BL_T}$ , где индекс «Т» указывает на то, что расчет теоретический. Произведение  $L \cdot k_y^{-1,75}$ , отличается от постоянной величины (от прямой, рис. 3) не более чем на  $\pm 2\%$ , поэтому для выделения основной зависимости индуктивности от  $k_y$  была принята степенная функция вида  $L(k_y) = L(1) \cdot k_y^{BL_T}$ , где  $L(1)$  – индуктивность пары с параллельными жилами. В таблице приведены некоторые значения показателя  $BL_T$ , рассчитанные по [2], для кабелей с диаметрами токопроводящих и изолированных жил 1)  $d_0 = 0,52, d_1 = 1,00$  мм и 2)  $d_0 = 0,64, d_1 = 1,20$  мм. Радиус экрана  $r_0$  изменялся от значения  $d_1$  до  $10d_1$ . Для отдельно экранированных пар ( $r_0 = d_1$ )  $BL_T$  составляет 2,5–2,7, а для пар кабелей с общим экраном ( $r_0 > 3 d_1$ ) – уменьшается до величины, лежащей в пределах от 1,5 до 2,0. В многопарных кабелях присутствие пар, окружающих рассматриваемую, может приводить к такому же эффекту, как и общий экран кабеля.

Радиус экрана, $r_0$	$d_0 = 0,52, d_1 = 1,00$ , мм		$d_0 = 0,64, d_1 = 1,20$ , мм	
	$L$ пар, мкГн/м	Степень $BL_T$	$L$ пар, мкГн/м	Степень $BL_T$
$d_1$	0,350	2,70	0,343	2,55
$2d_1$	0,488	2,37	0,478	2,15
$3d_1$	0,516	2,05	0,506	1,85
$5d_1$	0,530	1,75	0,520	1,60
$10d_1$	0,539	1,45	0,526	1,50

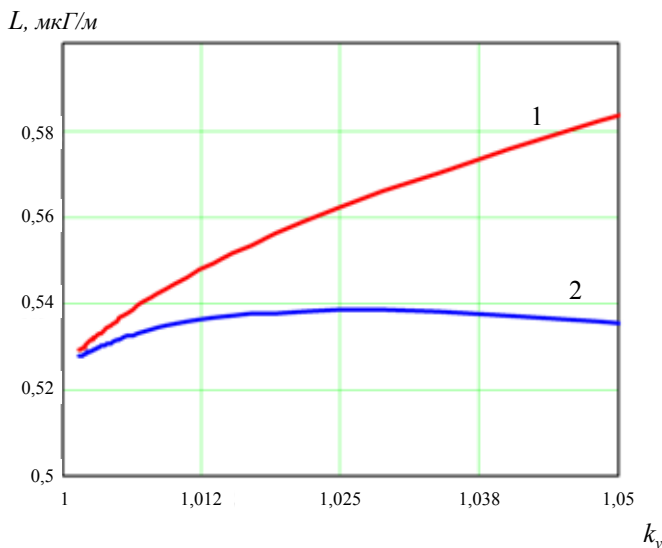


Рис. 3. Зависимость индуктивности пары  $L$  от коэффициента укрутки: 1 – рассчитанная по [2]; 2 –  $L$ , умноженная на  $k_y^{-1,75}$

Для кабеля с  $d_0 = 0,52, d_1 = 1,0$  мм результаты расчета зависимости индуктивности пары от коэффициента укрутки жил показаны на рис. 3.

Для оценки других причин, влияющих на зависимости  $C$  и  $L$  от  $k_y$ , были рассмотрены результаты измерений  $C$  и  $L$  образцов LAN-кабелей со сплошной полиэтиленовой изоляцией, собранных от разных изготовителей. Диаметры токопроводящих жил составляли (0,51–0,52) мм, а диаметры жил по изоляции – (0,89–1,00) мм. Измерения проводили на образцах длиной по (80–100) м. Аппроксимация экспериментально полученных зависимостей  $C$  и  $L$  от  $k_y$  выполнена с использованием линейные зависимостей логарифмов

$$\ln(C) = \ln(C_n) + BC \ln(k_y), \quad \ln(L) = \ln(L_n) + BL \ln(k_y).$$

Значения  $\ln(C_n), \ln(L_n), BC, BL$  определены методом средних квадратов, затем по ним получены выражения

$$C = C_n \cdot k_y^{BC}, \quad L = L_n \cdot k_y^{BL}, \quad (3)$$

где  $C_n, L_n$  – значения емкости и индуктивности при  $k_y = 1$ , а  $BC, BL$  – постоянные коэффициенты.

Отношения между  $BL$  от  $BC$  в виде группы точек приведены на рис. 4. Точки распределились на два участка. На участок  $BC < 1,5$ , где  $BL$  не зависит от  $BC$ , и на участок  $BC > 1,5$ , где между  $BC$  и  $BL$  просматривается линейная зависимость. Три значения  $BC$  менее нуля и менее единицы, можно отнести к случайным отклонениям. Далее они не учитывались. На втором участке средняя зависимость между  $BC$  и  $BL$  определена прямой

$$BL \approx 3,3 - 0,825 \cdot BC. \quad (4)$$

Чтобы выделить роль каждой из причин,  $BC$  и  $BL$  были разделены на слагаемые  $BC = a + b + d, BL = a - b$ , где  $a$  – оценка влияния спиральности жил,  $b$  – показатель сближения жил в паре и  $d$  – показатель увеличения эквивалентной диэлектрической проницаемости с увеличением площади контакта изоляции жил при деформировании.

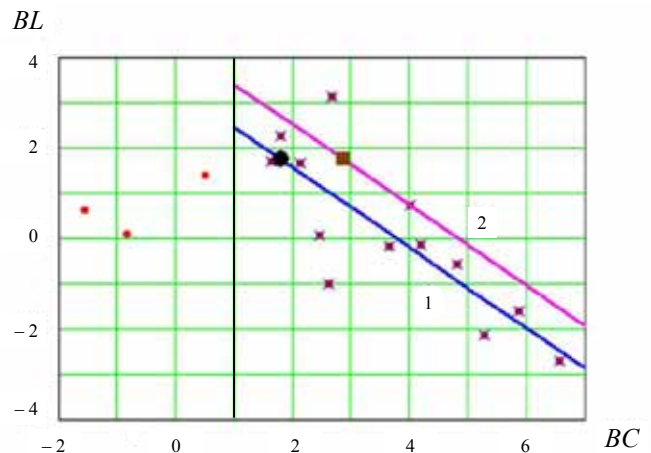


Рис. 4. Зависимости между  $BL$  и  $BC$  по результатам измерений образцов LAN-кабелей от разных изготовителей и разных партий;  $\times$  – по результатам измерений образцов кабелей, 1 – средние значения,  $BL = 3,3 - 0,825 \cdot BC$ , где  $\bullet$  –  $BC$  в отсутствие деформации изоляции,  $BC = BL = a = 1,81$  практически совпадает с расчетным по [2]; 2 – предельные значения  $BL = 4,3 - 0,825 \cdot BC$ , где  $\blacksquare$  –  $BC$  в отсутствие деформации изоляции,  $BC = 1,67BL = 1,67a$

Если скрутка выполнена без деформирования изоляции жил, то  $b$  и  $d$  должны быть равны нулю (рис. 2). При этом  $BC = BL = a$ , и из (4) следует  $a = 3,3 - 0,825 \cdot a$ , или  $a = 1,81$ . (5)

Данное значение  $a$  практически совпадает с теоретическим ( $a_{\tau} = 1,75$ ).

По наклону прямой (4) можно оценить и зависимость между  $b$  и  $d$ . Если из (4) вычесть уравнение (5), то получим  $b = 0,825(b + d)$  или  $d = 0,2121b \approx 0,2b$ . Данное отношение, однако, получено только для сплошной полиэтиленовой изоляции. При замене материала изоляции на более жесткий или более мягкий материал отношение между  $b$  и  $d$  изменится.

Кроме средней линии на рис. 4 через наиболее удаленную от рассматриваемого массива точку ( $BC = 4,0$ ,  $BL = 0,75$ ) проведена вторая линия. Точка ( $BC = 2,7$ ,  $BL = 3,1$ ) не учитывается как самое большое случайное отклонение. Вторая линия имеет тот же наклон, что и первая, но имеет большее значение постоянного члена

$$BL' = 4,3 - 0,825 \cdot BC. \quad (6)$$

Из (6) следует, что при отсутствии деформации, то есть при  $BL' = a = 1,81$  (среднее и теоретическое значение) теоретическое значение  $BC'$  может оказаться большим, чем для  $BL'$ , и ожидается лежащим примерно в промежутке  $a < BC' / BL' < 1,4a$ .

Степенная зависимость параметров от  $k_y$  удобна для оценок вторичных параметров. Используя значения  $a$ ,  $b$ ,  $d$ , применим (4) к волновому сопротивлению  $Z_c$ , времени задержки сигнала  $\tau$  и коэффициенту затухания кабеля  $\alpha$  на высоких частотах. После подстановок получим

$$\text{для } Z_c = \sqrt{L/C} = Z_{c0} \cdot k_y^{BZ},$$

$$\text{где } BZ = 0,5(BL - BC) = -(b + 0,5d) = -1,1 \cdot b, \quad (7)$$

$$\tau = \sqrt{L \cdot C} = \tau_0 \cdot k_y^{B\tau},$$

$$\text{где } B\tau = 0,5(BL + BC) = a + 0,5d = a + 0,1 \cdot b. \quad (8)$$

Сохраняя линейную зависимость сопротивления жил пары от  $k_y$  с учетом (7) для коэффициента затухания получим формулу

$$\alpha \approx \frac{R}{2Z_c} = \frac{R_0}{2Z_{c0}} \cdot \frac{k_y}{k_y^{-1,1b}} = \frac{R_0}{2Z_{c0}} \cdot k_y^{1+1,1b}. \quad (9)$$

Из (7) и (8) следует, что если диаметры токопроводящих и изолированных жил в кабеле от пары к паре не меняются, то отклонения волновых сопротивлений по парам определяется только величиной  $b$ , то есть степенью деформирования изоляции и, соответственно, зависят от оборудования и настройки технологического процесса. Чтобы уменьшить отклонение  $Z_c$  в кабеле от номинального значения по парам, нужно уменьшить поперечную деформацию изоляции при скрутке.

Время задержки  $\tau$  связано в основном с  $a$ , поэтому  $B\tau$  зависит главным образом от шагов скрутки пар в кабеле и в меньшей степени от деформирования изоляции жил кабеля.

Коэффициент затухания пар с увеличением степени деформирования изоляции жил при скрутке увеличивается.

Приведенные результаты получены на ограниченном статистическом материале, поэтому их следует принимать как приближенные, а обработку – как метод анализа экспериментальных данных. Более точные зависимости параметров от  $k_y$  можно получить, если  $C$  и  $L$  анализировать отдельно по результатам измерений кабелей одной марки и одного изготовителя. Результаты анализа при этом могут быть использованы для корректировок технологического процесса с целью, например, уменьшить отклонения волновых сопротивлений пар кабеля от номинального значения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов К.К. Расчет электрических емкостей многожильного кабеля с комбинированной изоляцией // Кабели и провода. – 2009. – № 3.
2. Бухгольц Г. Расчет электрических и магнитных полей. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961.

## ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА» МОЖНО В РЕДАКЦИИ

**Стоимость подписки на II полугодие 2010 года (3 номера), в рублях с учетом НДС:**

для членов Ассоциации «Электрокабель» – 1062 руб.,  
для учебных заведений и студентов – 390 руб.,  
для остальных подписчиков России и стран СНГ – 1170 руб.,  
для подписчиков других зарубежных стран – 33 у.е.

**По вопросам подписки обращайтесь**  
к Алле Евгеньевне Тимофеевой: (495) 918–1627

Копию платежного поручения с отметкой банка об исполнении для юридических лиц или квитанцию почтового перевода для физических лиц вышлите, пожалуйста, по адресу: ООО «Журнал «Кабели и Провода», Россия, 111024, Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5, офис 1202. E-mail: kp@vniikp.ru

#### Реквизиты для оплаты в рублях:

ИНН 7722159427;  
КПП 772201001;  
ОКОНХ 87100  
р/с: 40702810238120102932  
в Лефортовском ОСБ 6901, г. Москва  
«Сбербанк России ОАО», г. Москва,  
к/с: 3010181040000000225  
БИК 044525225; ОКПО 18711078.

Подписной индекс  
в каталоге агентства «Роспечать» – **79943**