

Витая пара с полувоздушной изоляцией

Показано, что применение полувоздушной изоляции на базе корделей из ПВХ пластикатов и мика-лент позволит создать огнестойкие (в трактовке МЭК 60331) искро- и взрывобезопасные кабели типа витой пары с характеристиками, превосходящими таковые у LAN-кабелей высших категорий, а также существенно уменьшит габариты кабелей, массу, погонные емкость и индуктивность. Показана малая чувствительность параметров кабелей к диэлектрическим характеристикам твердых деталей изоляции, что позволяет технологам сосредоточиться на антистатических, механических, огнестойких и других свойствах кабелей, полезных для применения во взрывоопасных производствах.

Как известно, одним из требований к кабелям для систем связи и передачи данных во взрывоопасных средах является оборудование их токопроводящих жил малогорючими и не накапливающими статические заряды изолирующими материалами. А конкретно, из ПВХ и/или резины, которые оказывают намного меньшее сопротивление постоянному току, нежели полиэтилен — ПЭ, в том числе вспененный, и другие пластмассы полиолефинового ряда. Это способствует стеканию статических зарядов, появляющихся по разным причинам в объеме и на поверхности деталей кабеля и способных инициировать подрыв горючих смесей, которые могут образовываться в атмосфере взрывоопасных помещений.

Но у ПВХ и резины повышенные значения диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 3 \dots 6$ против $1.6 \dots 2.5$ у ПЭ) и тангенса потерь ($\tan \delta = 0.005 \dots 0.1$ против $0.0001 \dots 0.001$). Такова цена, которую приходится платить за антистатические свойства и самозатухание пламени.

Повышенная величина ϵ ведет к повышению погонной емкости кабелей C , что неблагоприятно с точки зрения искробезопасности. Например, стандарты [1,3] ограничивают величину C и L (табл. 2) сверху. Но, чтобы уменьшить этот параметр, необходимо увеличивать поперечный размер витой пары. И попутно увеличивать индуктивность L , так как она достаточно жестко связана с C :

$$V^2 = (L/C)^{1/2},$$

где V — скорость света в изоляторе кабеля.

Смысл верхних ограничений параметров L и C понятен. Дело в том, что стандарт [1] регламентирует свойства таких кабелей для сетей промсвязи, которые, помимо передачи информации, реализуют также функцию электроснабжения полевых устройств

сети: датчиков и/или исполнительных механизмов. В результате шины могут запасать значительную магнитную и электрическую энергию:

$$W = D (LJ^2/2 + CU^2/2),$$

где J и U — ток и напряжение между жилами кабеля (то и другое — сумма токов и напряжений сигналов и питания), D — длина кабеля.

В случаях обрывов жил и/или пробоев их изоляции, эта энергия может освободиться в этом месте и послужить запалом для подрыва горючей смеси. Очевидно, что снижение параметров L и C снижает вероятность такого подрыва, которая согласно [2], не должна превышать 10^{-3} .

Помимо этого, стандарты [1,3], а также нормы на кабельные сети для интерфейсов 485 [4] и Ethernet нормируют величину волнового сопротивления Z_0 :

$$Z_0 = (L/C)^{1/2}.$$

Соответственно 100 [1,3], 120 [4] и 150 Ом для ряда приложений скоростного Ethernet 1000BASE. Это — дополнительное ограничение на параметры L и C .

В целом все эти ограничения осложняют задачу проектирования, расчета и производства кабелей для разных сетей связи. Особенно высокочастотных, где обычно предусматривают также нормативы и на скорость сигнала V или величину V/c (точнее, ее разброс), где $c = 299792458$ м/с — скорость света в вакууме. Там же начинают играть заметную роль диэлектрические потери.

Последнее обстоятельство заставляет разработчиков кабельных изделий заменять «нехорошие» изоляторы наподобие ПВХ и резины диэлектриками из ПЭ и других полиолефинов, в том числе вспененных, так как замена пластика воздухом снижает как диэлектрическую постоянную, так и тангенс потерь.

Этот прием широко применяют для изоляции жил витых пар. Но у него есть известные недостатки. Это и усложненная технология экструзии, и известная нестабильность свойств изоляции, особенно для трехслойной пленко-пористо-пленочной структуры. А также ограничения на снижение ϵ , которое, как правило, не получается меньше ~ 1.6 . А $\tan \delta$ — меньше ~ 0.0001 . Это связано прежде всего с механическими свойствами изоляции, что не позволяет разбавлять объем пластика газом более предельных значений (около 50%).

И еще, как правило, при вспенивании полимерной изоляции образуется сплошная пленка на поверхности жилы. Но, как показано в [6], именно прилегающие к жиле объемы изолятора оказывают наибольшее влияние на свойства кабеля в целом. И, стало быть, необходим надлежащий контроль толщины и свойств этой пленки. А заодно и всей изолирующей структуры. Что заметно усложняет процесс экструзии. Более того, для огнестойкого кабеля применение вспененной изоляции не применяется в виду неизбежного расширения и разрыва пор при нагревании.

Все это заставляет обратиться к другому, более простому, давно известному и достаточно надежному приему — применению полувоздушной изоляции. Подобной описанной в [5] для коаксиальных кабелей.

Цель предлагаемой работы — исследование свойств экранированных витых пар с жилами, оборудованными полувоздушной (кордельно-пленочной) изоляцией.

Простейшая конструкция жилы с полувоздушной изоляцией

На рис. 1 представлена простейшая конструкция жилы с полувоздушной изоляцией. Она представляет собой круглую медную жилу, на которую наложена спираль из круглого же корделя в оболочке из мика-ленты. Мика-лента выбрана для обеспечения огнестойкости в понимании МЭК 60331. Несколько не традиционное расположение обмотки из мика-ленты объясняется желанием уменьшить влияние нестабильного по диэлектрическим свойствам материала на первичные параметры кабеля. Сохранение же огнестойкости при таком расположении возможно при использовании для корделя малодымных самозатухающих высоконаполненных полимерных материалов, в том числе, керамизирующихся в условиях пожара.

Справа на рис. 1 — построенная в Excel эпюра сечения жилы и корделя плоскостью А-А. Форму сечения рассчитали методами аналитической и дифференциальной геометрий.

Как видно, при малых шагах спирали Н форма сечения корделя резко отличается от эллиптической (пунктир), характерной для сечений круглых цилиндров под таким же углом β . Впрочем, при $H/d > 10$ этим отличием можно пренебречь. А при $H/d > 20$ — вообще сечение корделя полагать круглым.

На рис. 2 представлено это сечение при различных шагах спирали. Наиболее поучительная деталь рисунка — обширные воздушные полости вокруг жилы даже при максимально плотной укладке спирали ($H/d = 1$).

Рис. 1. Схема полувоздушной изоляции жилы с помощью спирального корделя. Справа — расчетные сечения жилы и корделя плоскостью А-А. Шаг спирального корделя $H = 3$ мм (диаметр жилы и корделя 1 мм). Пунктир — эллипс — сечение плоскостью А-А прямого круглого корделя

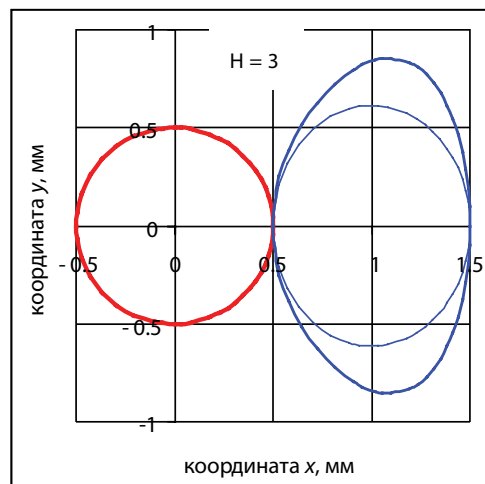
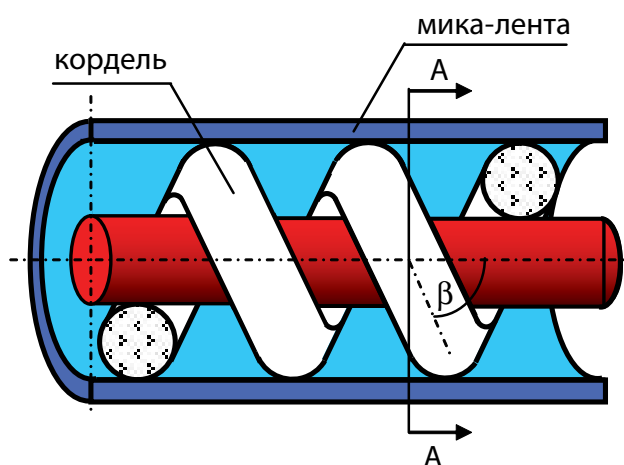
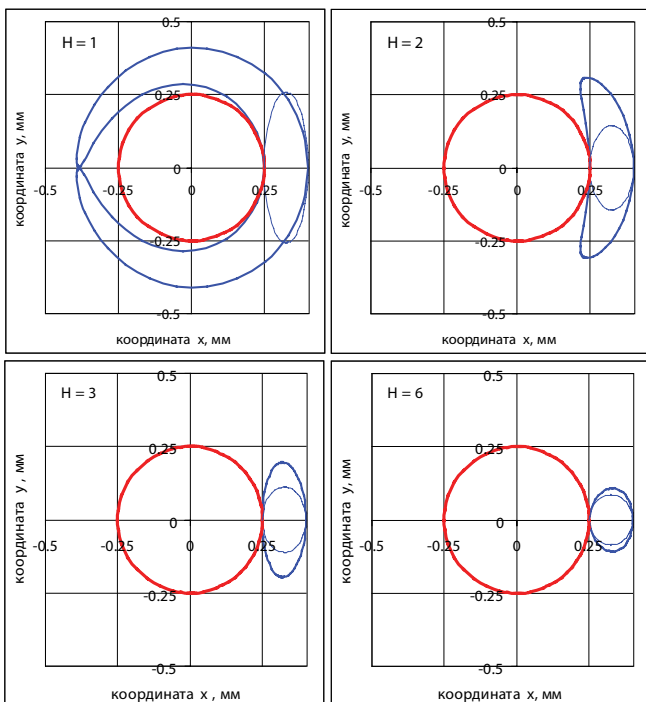


Рис. 2 Сечение спирального корделя с разными шагами H (в единицах диаметра корделя d).
 $H = 1$ — максимально плотная укладка корделя вокруг жилы.
 Пунктир — сечение не скрученного корделя.
 Красная окружность — периметр жилы.



В табл. 1 даны параметры материалов, использованные в численных экспериментах. Как видно, материалы изоляторов не самого лучшего качества. Так, кордель предполагали изготовленным из ПВХ с параметрами, близкими к средним для этого пластика. Свойства же мика-ленты были выбраны близкими к самым плохим для широко применяемых изоляционных материалов (ПВХ, резина). Это обусловлено тем соображением, что мика-ленты, как правило, — многослойные и многокомпонентные изделия. А неоднородности изолятора, если это — не газовые включения, должны увеличивать диэлектрические потери.

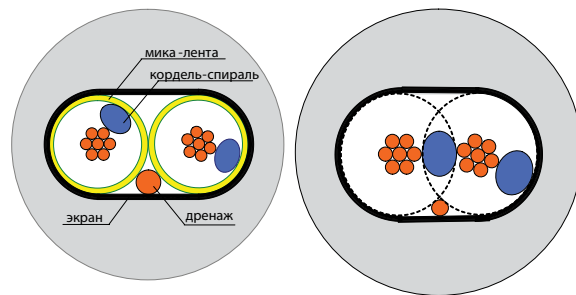
Табл. 1. Параметры деталей витой пары с полувоздушной изоляцией.

		σ , Сим/м	ε	$\text{tg} \delta$
жила $\varnothing$, мм	1.2	$5.98 \cdot 10^7$		
экран	0.1*	$3.72 \cdot 10^7$		
кордель			4.0	0.02
мика-лента	0.1*		6.0	0.1
*толщина, мм				

Зависимость емкости симметричной пары от угла поворота корделя

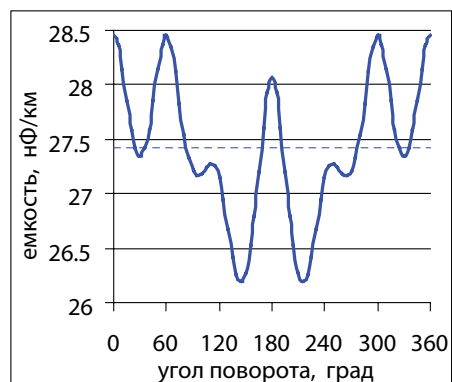
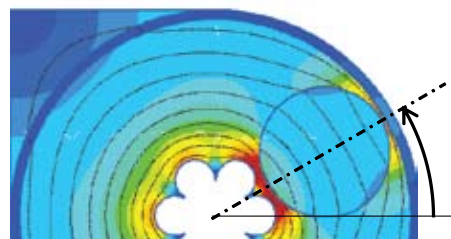
Рассмотрим симметричную пару в овальном экране, скрученную из семипроволочных жил с полувоздушной изоляцией (рис. 3). Здесь внутриэкранное пространство в основном заполнено воздухом.

Рис. 3. Сечение кабеля витая пара с полувоздушной изоляцией. Справа — без мика-лент



Емкость зависит от позиции корделей относительно жил и друг друга. Пусть шаг спирали настолько велик, что сечение корделя можно считать круглым (здесь это не имеет принципиального значения, зато упростит вычисления). На рис. 4 представлена зависи-

Рис. 4. Зависимость емкости пары от угла поворота. Горизонтальный пунктир — среднее значение. Вверху — фрагмент цветовой карты напряженности электрического поля. Следует обратить внимание на наложение колебаний емкости с периодом 360° и 60°



мость межпроводной емкости пары от угла поворота корделя. Размеры пары подобрали с таким расчетом, чтобы волновое сопротивление было около 120 Ом. Для удобства расчетов и усиления эффекта полагали, что спирали корделей зеркально-симметричны (помимо прочего, это препятствует продавливанию мика-лент корделями при скрутке жил в пару).

График демонстрирует сложную зависимость емкости от угла, где на период 360° (здесь — с размахом 0.90 нФ/км) накладываются характерные для семипроволочных жил колебания с периодом 60° (0.54 нФ/км). Здесь и далее вычисления производили с помощью программного пакета ELCUT.

Отметим, что емкость пары с азимутом корделя около 90° практически совпадает со средним значением (в данном примере 27.4 нФ/км). По этой причине другие исследования проводили именно с такой позицией корделя.

Зависимость емкости от шага спирального корделя

Как видно из рис. 2, изменение шага спирального корделя ведет к изменению формы и размера области изолятора, заполненного твердым материалом. Что, в свою очередь вызывает изменение емкости и ряда других параметров пары. На рис. 5 представлены графики зависимости некоторых из них от шага спирали.

Для наглядности приведены также графики при наличии только мика-ленты (горизонтали) и только корделя (кривые, приближающиеся к горизонталям по закону $\sim \beta^2$).

Тут следует отметить, что суммарное действие мика-ленты и корделя несколько больше арифметической суммы их «парциальных» вкладов. Это связано с электрическим взаимодействием указанных твердых деталей.

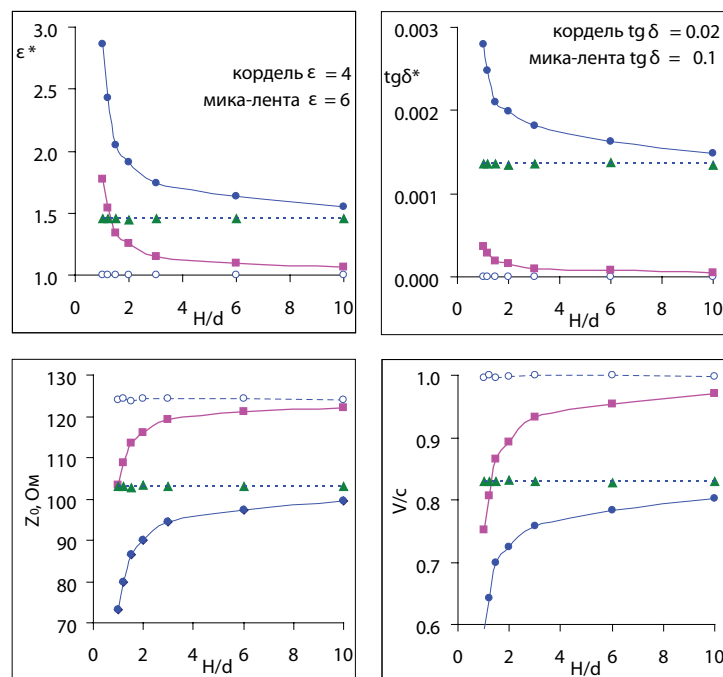
Наиболее интересны графики эффективной постоянной ϵ^* и действующего тангенса потерь $\text{tg}\delta^*$. Они существенно меньше, чем у мика-ленты и корделя даже при максимально плотной укладке спирали ($H/d=1$).

Таков эффект «разбавления» изолирующего пространства воздухом и, что еще важнее, удаления объема диэлектриков от поверхности жил. То есть от области максимального электрического поля и максимальных диэлектрических потерь.

Как будет показано ниже, малая величина ϵ^* позволяет заметно уменьшить диаметр кабеля и его массу. А рис. 5 показывает, что регулировкой H/d можно тонко управлять выходными параметрами кабеля.

Рис. 5. Зависимость параметров витой пары от шага спирального корделя (синие точки).

Синие кружки — для пары с воздушным изолятором. Зеленые треугольники — вклад мика-ленты (без корделя). Сиреневые квадраты — вклад корделя (без мика-ленты). Линии проведены по точкам.



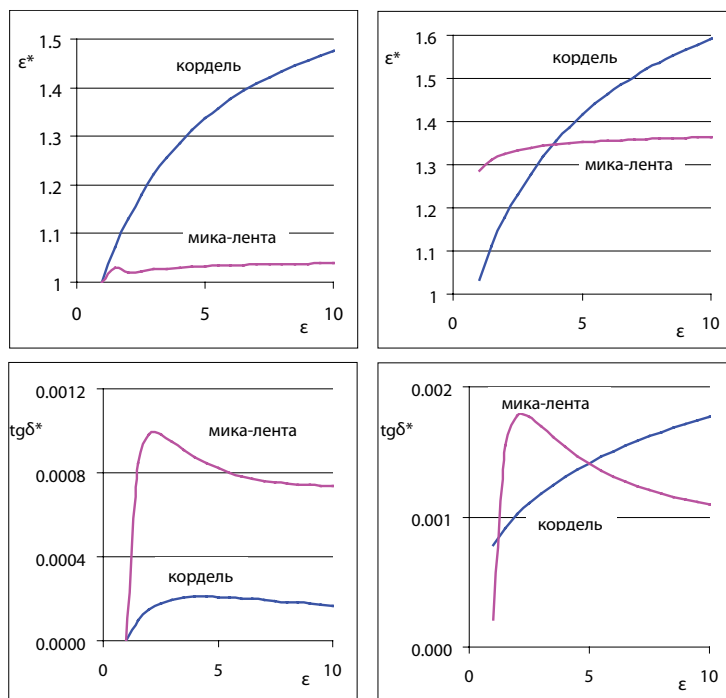
Зависимость эффективных диэлектрических параметров от свойств изоляторов.

Как показано в предыдущем параграфе, эффективные параметры полувоздушной изоляции ϵ^* и $\text{tg}\delta^*$ существенно понижены относительно составляющих его твердых диэлектриков. На рис.6 представлена их зависимость от ϵ корделя ($\text{tg}\delta = 0.02$) и мика-ленты ($\text{tg}\delta = 0.1$). Рядом — зависимость от ϵ корделя (но у мика-ленты $\epsilon = 6$), и ϵ мика-ленты (у корделя $\epsilon = 4$). Шаг H полагали (бесконечно) большим.

Основная особенность графиков в том, что и здесь ϵ^* и $\text{tg}\delta^*$ намного меньше параметров твердых диэлектриков изоляции, причем ϵ^* в разы, а $\text{tg}\delta^*$ — на порядки величины. В рассматриваемом случае основной вклад в формирование ϵ^* полувоздушного изолятора вносит кордель, а в $\text{tg}\delta^*$ — мика-лента. Хотя для других комбинаций ϵ и $\text{tg}\delta$ бывает иначе.

Отметим, что графики для мика-ленты проходят через максимум. Рост поглощения при малых ϵ понятен: возрастает проводимость диэлектрических потерь $\epsilon_0 \text{tg}\delta$. Но, как видно из рис. 7, при больших ϵ мика-лента как бы отталкивает от себя электри-

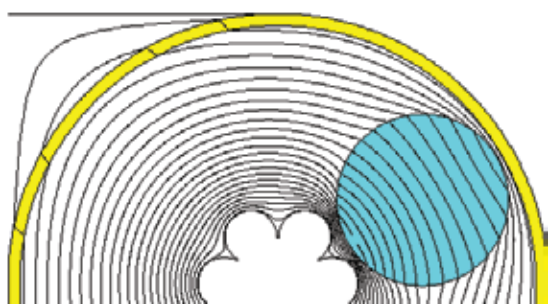
Рис. 6. Зависимость эффективных параметров кабеля ϵ^* и $\text{tg}\delta^*$ от диэлектрической постоянной ϵ корделя и мика-ленты (кривые с одноименными надписями). Слева — от ϵ корделя (у мика-ленты $\epsilon = 1$; $\text{tg}\delta = 0$), и от ϵ мика-ленты (у корделя $\epsilon = 1$; $\text{tg}\delta = 0$). Справа — от ϵ корделя (у мика-ленты $\epsilon = 6$; $\text{tg}\delta = 0.1$) и от ϵ мика-ленты (у корделя $\epsilon = 4$; $\text{tg}\delta = 0.02$).



ческое поле, в результате чего значительная часть ее объема «выключается» из процесса поглощения энергии. Видимо, этим и можно объяснить максимум и последующее спадание диэлектрических потерь.

И еще. Как видно из графиков, твердые детали вообще слабо влияют на эффективные параметры полувоздушной изоляции в целом и с ростом

Рис. 7. Фрагмент рельефа электрического потенциала в изоляторах пары с полувоздушной изоляцией (кордель $\epsilon = 4$, мика-лента $\epsilon = 10$). Следует обратить внимание на излом линий потенциала в мика-ленте (желтая полоса), демонстрирующий эффект «отталкивания» мика-лентой электрического поля. Многопроволочная жила



э это влияние даже относительно ослабляется. И это тоже понятно. Пусть, к примеру, у мика-ленты $\epsilon \rightarrow \infty$. Тогда ее можно просто заменить металлом, что эквивалентно небольшому уменьшению толщины изолятора и некоторому росту C . Если теперь формально вычислить ϵ^* , то получим как раз ту величину, к которой асимптотически приближаются ϵ^* рисунка по мере роста ϵ .

Кабели с полувоздушной изоляцией для промышленных сетей

В табл. 2 приведены основные характеристики искробезопасных кабелей экранированная витая пара для работы в сетях промсвязи FF [3] и с интерфейсами 485 [4].

В табл. 3. приведены расчетные характеристики кабелей с полувоздушной изоляцией. Шаг H , как и выше, полагали большим.

Табл. 2. Основные параметры кабелей сетей промсвязи во взрывоопасных производственных средах

	FF	485
Волновое сопротивление Z_0 , Ом	100 (32.5 КГц)	120 (150 ¹⁾)
Сечение медных жил A , мм ²	1.0	1.0 ²⁾
Эффективный диаметр жил $2a$, мм	1.20 (1.28 ³⁾)	1.20 (1.28)
Максимальная длина линии, м	1900	1200
Затухание Att , дБ/км	< 3 (39 КГц)	< 14.6 ⁴⁾
Рабочая частота F	32.5, 39 КГц	1... 10 МГц
Толщина алюминиевого экрана $T_э$, мм	0.1	0.1
Емкость, нФ/км	45 < C < 200	-
Индуктивность, мГн/км	0.4 < L < 1	-

1. Для технологии Ethernet 1000BASE-CX (1.25 Гбит/с, 625 МГц, 25 м)
2. В стандарте 485 — провод 0.226 мм² (AWG 24), но для искробезопасных применений ГОСТ не допускает меньше 1.0 мм².
3. В скобках — диаметр семипроволочной жилы (круглой: 1.13 мм).
4. Стандарт 485 регламентирует минимум выходного сигнала линии 0.2 В при входном 1.5 В (затухание 17.5 дБ). Для дистанции 1200 м это соответствует погонному затуханию 14.6 дБ/км.

На частоте 39 КГц затухание $Att(39)$ у всех кабелей надежно меньше 3.0 дБ/км. То есть отвечает допуску стандарта [3]. Здесь следует отметить, что у кабелей со сплошной изоляцией жил, этот показатель вплотную проходит к 3.0, как это видно в табл. 3 для строки $Z_0 = 100$ Ом, либо несколько превышает его допуск для других изоляторов. И вообще параметры кабеля со сплошной изоляцией жил намного хуже по всем показателям: диаметру кабеля, емкости, индуктивности и скорости сигнала, как видно по числам в скобках в строке $Z_0 = 100$ Ом.

Табл.3. Параметры кабелей с полувоздушной изоляцией. Частота 1 МГц, сечение жил 1 мм²

Z0 Ом	корд мм	кабель мм	C нФ/км	tgδ*
100*	0.73	6.52 (10.0)	36.8 (69.4)	1.6 10 ⁻³ (0.02)
120	1.02	7.69	30.9	1.4 10 ⁻³
150	1.66	10.24	25.7	1.3 10 ⁻³

Z0 Ом	L мГн/км	V/c	Att дБ/км	Att(39) дБ/км
100*	0.368 (0.694)	0.910 (0.480)	6.69	2.71 (2.95)
120	0.449	0.896	5.59	2.30
150	0.577	0.867	4.50	1.88

* В скобках — для кабеля со сплошной изоляцией $\epsilon = 4$, $\text{tg} \delta = 0.02$, 39 КГц.

На рис. 8 представлен частотный ход затухания и других параметров «полувоздушных» кабелей. Приведены графики полного затухания для условий, предусмотренных стандартом 485 (1200 м, частоты 1...10 МГц). Здесь горизонтальный пунктир — уровень затухания 17.5 дБ, ограниченный этим стандартом. Как видно, кабели обеспечивают работу в значительной части указанного частотного диапазона.

Но наиболее интересно их высокочастотное поведение. Из описания кабелей категории 8 (LAN-8) в [7] можно заключить, что их граничная частота 1200 МГц обусловлена перевесом затухания перекрестной помехи (69.8 дБ) над затуханием сигнала (69 дБ), что обеспечивает отношение сигнал-шум на входе приемника 0.8 дБ (отношение амплитуд $c/\text{ш} = 1.1$). Будем полагать, что 69 дБ — удовлетворительный уровень затухания сигнала в таких кабелях (на рис. 8 — горизонтальный пунктир).

И, как видно из рисунка, на частоте 1200 МГц «полувоздушные» кабели обеспечивают этот норматив с большим запасом: $c/\text{ш} = 9, 19$ и 27 дБ соответственно для 100, 120 и 150 Ом. И, хотя дальнейший ход затухания показывает, что они вряд ли смогут претендовать на категорию LAN-9 (видимо, около 2 ГГц), указанный запас весьма полезен с точки зрения повышения надежности передачи данных.

Особо отметим такое забавное обстоятельство. Как указано выше, снижение емкости и индуктивности кабелей — благоприятный фактор. Но Законодатель по какой-то причине ограничил эти параметры снизу (табл. 2) такими величинами, что емкости (а для 100 Ом и индуктивность) кабелей в табл. 3 уходят под нижнюю границу допуска. Так что не исключено, что при изготовлении кабелей придется специально

ухудшать их искро- и взрывобезопасные свойства, чтобы обеспечить требования стандартов, эти свойства регламентирующих. Или, если у Законодателя нет иных, более существенных соображений, то в этой части стандарты целесообразно подкорректировать.

Кабели без мика-ленты

Так как мика-лента оказывает заметное воздействие на свойства кабеля, возникает мысль вообще от нее избавиться (что возможно только для кабелей, неогнестойких в трактовке МЭК 60331-23 [8]). Тогда жилы пары разделены только их спиральными корделями. На рис. 3 показано сечение такого кабеля. Отметим попутно, некоторое технологическое осложнение: шаги H_1 и H_2 и направление намоток корделей на жилу должны совпадать, если желательно избежать периодических возмущений геометрических и других свойств пары с шагом $H_1 H_2 / (H_1 - H_2)$

Тем не менее, расчеты показали, что удаление мика-ленты, хотя и улучшает ряд характеристик кабеля, но не значительно. Так, снижение емкости и индуктивности происходит всего на 4, 5 и 7% (соответственно для 100, 120 и 150 Ом), а увеличение скорости — всего на 4, 5 и 7%. И все это — ценой роста диаметра корделя на 26, 19 и 9% и кабеля в целом на 5, 4 и 3%. При практически том же затухании.

Обсуждение

Как показывает табл. 3, для снижения затухания сигналов целесообразно повышать волновое сопротивление линий связи. Физически это связано с ролью омических потерь R в проводниках кабеля и диэлектрических в его изоляторах:

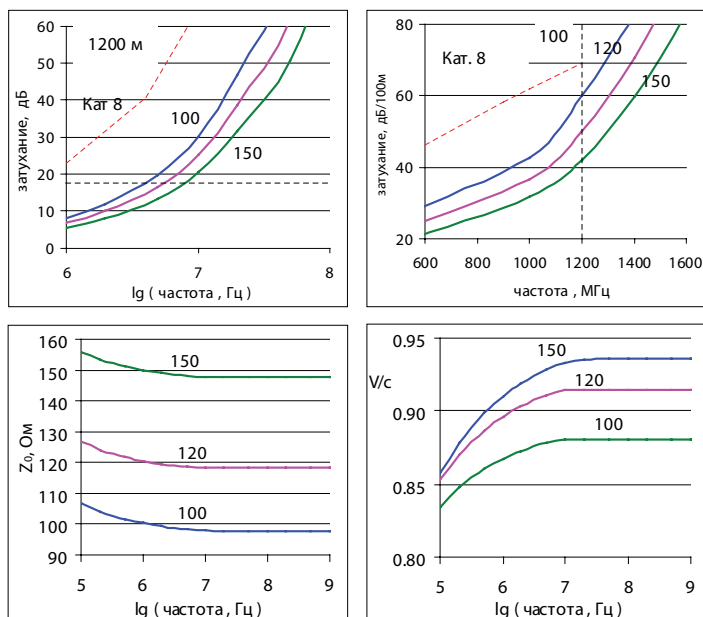
$$\text{Att} = 8.686 [R/2Z_0 + \omega C \text{tg} \delta * Z_0/2],$$

где вклад второго слагаемого становится заметным лишь на частотах выше ~ 100 МГц, а сравнимым с омическим — выше ~ 1 ГГц. Так что на всех применяемых в системах связи частотах затухание сигнала вызвано в основном поглощением их энергии проводниками (жилами). По этой причине повышение Z_0 благоприятно.

Видимо, это и вызвало эволюцию волновых сопротивлений линий связи от 50 и 75 Ом у коаксиальных фидеров, до 100 Ом у витых пар и далее до 120 (стандарт 485) и 150 для некоторых скоростных приложений Ethernet.

Коль скоро роль диэлектрических потерь мала, то понятна упомянутая выше слабая реакция кабельного изделия на удаление мика-ленты. К тому же, если

Рис.8. Частотные зависимости параметров кабелей с полувоздушной изоляцией. Вертикальный пунктир 1200 МГц — граничная частота LAN-кабелей категории 8 (красный пунктир — график предельно допустимого затухания). Горизонтальный пунктир 17,5 дБ — предельно допустимое затухание по стандарту 485. На уровне 69 дБ — затухание LAN-8 на частоте 1200 МГц.



посмотреть на графики рис. 6, от нее вообще мало что зависит. Кроме того, они же показывают и слабую зависимость свойств кабеля от качества корделя.

В свете этого может вызвать удивление снижение на 0,2 дБ/км затухания в «полувоздушных» парах, относительно затухания сигнала в линиях, оборудованных сплошной изоляцией (строка 100 Ом в табл. 3). Это — огромная величина, так как на частоте 39 КГц диэлектрические потери ничтожны (~0,0002 Дб/км), и их ослабление, которое обеспечивает полувоздушная изоляция, такого дать не может.

Ключ к этой загадке — в экране пары. Обычно экран принято считать неким пассивным элементом, который лишь как-то меняет емкость и индуктивность кабеля и защищает от внешних помех. Или, напротив, — окружающую среду от его электромагнитного поля.

На самом деле экран — куда более интересная и активная деталь. В частности, его сопротивление может как увеличить затухание сигнала (то есть увеличить параметр омических потерь R), так и, напротив, — уменьшить (как бы подключившись к R параллельно). Последний эффект иллюстрирует рис. 9, где показана цветная карта распределения токов в жиле и расположенном рядом экране. Как видно, ток жилы индуцирует в экране антипараллельный

ток. Роль этого тока двоякая. С одной стороны, он греет экран и, стало быть, увеличивает затухание сигнала. Но с другой, он (ре)индуцирует в жиле ток, параллельный току жилы. И, таким образом, экран как бы подключается параллельно жиле. Что, очевидно, снижает затухание.

Отметим интересную особенность распределения токов на рис. 9. Как видно, индуцированный жилой антипараллельный ток в экране концентрируется в области, ближайшей к жиле. И это — интуитивно понятно. Но, если пустить ток в экране, то он, вместо того, чтобы распределиться по объему экрана или, при развитом скин-эффекте, — по его поверхности, тоже прижимается к токопроводящей жиле. Это, пожалуй, — один из самых контрастных примеров действия эффекта близости.

В целом роль экрана — отдельная тема, выходящая за рамки данной статьи. Так как эта роль зависит от множества факторов: частоты, проводимости и толщины экранов, их формы и расположения относительно сигнальных жил. Отметим лишь, что при симметричном удалении экрана от жил возрастает его роль как поглотителя энергии сигнала. А приближение стенки экрана к одной из жил «помогает» распространению сигнала, как это показывает рис. 9.

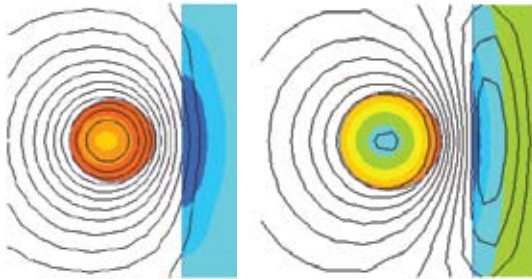
Итак, можно понять причину пониженного затухания в кабеле с полувоздушной изоляцией. При неизменной величине Z_0 габариты кабеля меньше, что при тех же размерах жил ведет к приближению к ним стенок экрана и росту их роли в качестве «помощников». Этому же способствует и овальная форма экрана.

Перспективы применения витых пар с полувоздушной изоляцией

Известно [7], что изоляторы из ПВХ применяют только для жил кабелей компьютерных сетей (LAN) категории 3 (граничная частота 16 МГц). В то время как для высших категорий 4 (20 МГц), 5 (100), 6 (250), 7 (600), 8 (1200) — только полиолефины, в том числе вспененные. Так как общепринято, что для высокочастотных кабелей ПВХ заведомо не пригоден.

Тем не менее, исследования данной работы показывают, что ставить на нем крест рано. Как можно видеть из рис. 8, применение его в качестве твердых деталей полувоздушной изоляции витых пар позволяет скачком перебросить их к категории LAN-8. С другой стороны, материалы с пониженными значениями ϵ и $\tan \delta$ (ПЭ, полипропилен, тефлон и тп), в том числе вспененные, тут не имеют особых преимуществ (рис. 6).

Рис.9. Отражение токов медной жилы в плоском полубесконечном алюминиевом экране (слева). А также отражение тока экрана в жиле (справа). Теплые тона — положительное направление тока, холодные — противоположное. Диаметр жилы 1 мм, частота 39 КГц



Более того, их применение может дать даже отрицательный эффект. Дело в том, что как показали специальные численные исследования, основную роль в формировании свойств полувоздушной изоляции играет даже не столько значительный объем в них воздуха (кстати, даже больший, нежели в пенных изоляторах), сколько минимальный контакт ее твердых деталей с поверхностью жилы. След этого явления можно видеть на рис. 4, где проход корделя над вершинами проволок жилы сопровождается бросками емкости. И в этом смысле механически более жесткий кордель может оказаться предпочтительнее вспененных материалов, эластичных и мягких.

Из этих соображений ясно, что, если жилы имеют левую скрутку, то кордель целесообразно пустить поверх нее правой спиралью. И оборудовать его не круглой, а рифленной (шлифованной) поверхностью. Обеспечив такими приемами минимум площади его контакта с жилой.

Выше упомянуто, что в технологии Ethernet 1000BASE-CX применяют кабели 150 Ом длиной 25 м с граничной частотой 625 МГц (табл.2). Но, как видно из рис. 8, оборудование таких кабелей полувоздушной изоляцией позволяет рассчитывать на увеличение дальности до 270 м. То есть, на порядок дальше.

Известно [7], что разработка кабелей LAN-8 обусловлена не в малой степени освоением технологии Ethernet 10G BASE (класса 10 Гбит/с). Известно также, что для этого используют как повышение рабочей частоты LAN-кабелей и параллельную работу их пар, так и уплотнение каналов связи с помощью многоуровневых сигналов. Но для этого необходимы достаточно высокие отношения сигнал/шум.

Если предположить, что приведенное выше отношение $c/\omega = 0.8$ дБ для LAN-8 в этом смысле достаточно, то запас 9, 19 и 27 дБ у «полувоздушных» пар позволяет повысить скорость потока данных в 11, 24

и 34 раза. Что равносильно выходу на уровень 100G BASE (100 Гбит/с).

Не малым преимуществом витых пар с полувоздушной изоляцией является также близость скорости сигнала в них к пределу $V/c = 1$. И вообще слабая зависимость от свойств пары. Все это — благоприятный фактор для многопарных кабелей связи с ограничениями на разброс этого параметра. Техническая сторона вопроса о реализуемости производства таких кабелей на существующем оборудовании выходит за рамки данной статьи. Мы лишь рассмотрели теорию.

И последнее, но не по важности. Результаты данной работы показывают, что применение полувоздушной изоляции, видимо, вплотную приблизит нас к максимально возможной рабочей полосе частот и скорости передачи данных с помощью металлических витых пар. Во всяком случае, по параметру затухания. Если так, то дальнейший существенный прогресс будет возможен лишь путем замены металлических жил другими материалами, свободными от омических потерь. Например, емкостными проводниками, возможные свойства которых описаны в [9].

Литература

1. ГОСТ Р 52350.27-2005 (МЭК 60079-27:2005) Концепция искробезопасной полевой шины (FISCO) и концепция невоспламеняющей системы полевой шины (FNICO).
2. ГОСТ Р 51330.10-99 (МЭК 60079-11-99) Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь i.
3. Рекомендации по проектированию систем FF. ревизия 2.0. — Austin, USA, AG181-2004
4. Application guidenes for TIA/EIA-485-A. — Arlington, USA TSB-89, 2002.
5. Н.И. Белорусов, И.И. Гроднев. Радиочастотные кабели. — М: Энергия, 1972
6. Е.М. Вишняков, Д.В. Хвостов. Несостоятельность некоторых традиционных методов расчета емкостных параметров триад и трехфазных кабелей. «Кабель-news». № 12-1, 2008, с. 44-48.
7. Д.Я. Гальперович, Ю.В. Яшнев. Инфраструктура кабельных сетей. — М: Русская панорама, 2006.
8. ГОСТ Р МЭК 60331-23-2003. «Испытания электрических кабелей в условиях воздействия пламени. Сохранение работоспособности. Часть 23. Проведение испытаний и требования к ним. Кабели электрические для передачи данных»
9. Е.М.Вишняков, Д.В.Хвостов. Емкостный проводник из полимерного композита с углеродными нанотрубками. «Кабель-news». № 12-1, 2009, с. 28-34.

Е.М. Вишняков, Д.В. Хвостов