

Игорь Лапко

Настоящий инженер должен уметь отличать кабель от кабеля

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий инженер должен уметь отличать кабель от кабеля, поскольку последствия ошибки выбора кабельно-проводниковой продукции приводят к серьёзным материальным потерям, что может фатально отразиться на карьере.

Данная статья поможет лучше ориентироваться и правильно выбирать в огромном разнообразии кабельно-проводниковой продукции, с которой приходится сталкиваться инженеру АСУ ТП, а также поможет понять, почему цена двух кабелей для RS-485 одинакового сечения может отличаться более чем в 4 раза. С этой целью подробно рассматриваются материалы и конструкция инструментальных кабелей и кабелей передачи данных, их влияние на эксплуатационные и экономические характеристики проектных решений. В заключение приведены преимущества выбора и применения качественного кабеля, подтверждённые практическим опытом всемирно известных компаний.

Кабель изобретён более сотни лет назад, и кабельная промышленность является классическим примером зрелой отрасли. За годы своего существования она видела всё — взлёты и падения, слияния и поглощения. В результате острой конкурентной борьбы выжили только сильнейшие, либо способные производить самый дешёвый кабель и умеющие экономить на всём, либо предлагающие продукцию, отличающуюся какими-то выдающимися

свойствами. К числу таких сильнейших по праву относится американская компания Belden, поэтому в качестве примеров в данной статье приведены изделия, технологии, решения именно этой компании.

Для того чтобы понять, каким образом производители достигают минимальной цены или уникальных эксплуатационных характеристик, рассмотрим материалы и конструкцию современных кабелей передачи сигналов и данных.

Компоненты, из которых состоит кабель, — это

- проводники,
- внешняя оболочка кабеля,
- внутренняя изоляция,
- экранирование и бронирование.

Собственно, ничего другого в кабеле нет.

Проводники

Проводники в кабелях могут изготавливаться из следующих материалов:

- меди лужёной и нелужёной (tinned, bare);
- омеднённой стали (copper covered steel — CCS);
- алюминия;
- никеля, серебра и т.д.

Конечно, со времени изобретения электричества медь широко используется для изготовления кабелей из-за высокой проводимости, хороших механических свойств и (когда-то!) дешевизны. Лужёная медь к тому же хорошо противостоит коррозии. Однако цены

на медь, как и на другие невозобновляемые ресурсы, бьют сегодня все рекорды, и нет причин для изменения этой тенденции. Поэтому для высокочастотных кабелей, где высокочастотный ток вытесняется в тонкий поверхностный слой проводника вследствие скин-эффекта, применяют омеднённую сталь.

Сравнительно дешёвый алюминий используют для изготовления экранов и оплётки. Проблему пайки решают с помощью лужёного медного дренажного провода, проложенного по всей длине кабеля.

Никель и серебро применяются для покрытия поверхностей высокодобротных высокочастотных кабелей с низкими затуханиями и потерями.

Классификация по AWG

AWG — это американский стандарт проводов (American Wire Gauge). Калибр провода в стандарте AWG отражает приведённый средний диаметр провода. Чем толще провод, тем меньше его калибр. Например, AWG 26 — это диаметр 0,404 мм, сечение 0,128 мм²; AWG 24 — диаметр 0,511 мм, сечение 0,205 мм².

Провода производятся на специальных волочильных станах посредством протягивания исходной заготовки через серию фильер. Компания Belden использует заготовку диаметром 8 мм (рис. 1) и имеет возможность получать из неё монолитный медный проводник толщиной с человеческий волос (AWG 44).



Рис. 1. Исходная заготовка и конечный продукт — проводник AWG 44



Рис. 2. Одножильный кабель

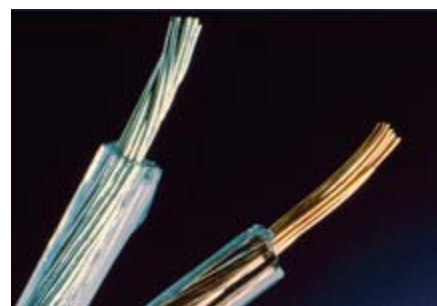


Рис. 3. Многожильные провода

Внутренний проводник кабеля может быть однопроволочным монолитным (solid) или многопроволочным (stranded). В обозначении это находит своё отражение следующим образом: AWG 24 (7x32), что означает 7 проволок AWG 32 с диаметром 0,610 мм и сечением 0,226 мм².

В высококонкурентной и зрелой кабельной отрасли цена кабеля определяется не жадностью фирм-изготовителей, а ценой использованных материалов. Для медных кабелей это прежде всего цена меди. Сэкономить на меди можно двумя способами: первый — это изобрести нестандартное сечение, а второй — это сэкономить собственно на меди.

Так, некоторые компании изобрели интересный маркетинговый ход: производить кабель с сечением, которое находится между стандартными типоразмерами AWG. Такие сечения тяжело выявлять, они, как правило, «чуть-чуть» меньше стандартных. Менеджеры по продажам убеждают в том, что это «почти» AWG XX, что как раз в ваших уникальных условиях данное сечение является оптимальным и тому подобное. Вам, конечно, решать, но в любом случае решение нужно принимать осознанно.

Ещё более пугающие тенденции наблюдаются на рынке отечественного силового кабеля. Быстро осознав, что основным критерием выбора кабеля у нас является цена, некоторые отечественные производители стали использовать вместо меди различные подозрительные сплавы, содержание меди в которых неуклонно падает.

Однако ставить знак равенства между двумя медными кабелями одинакового сечения нельзя. Меломаны знают, что и медь бывает разной. Так, при изготовлении микрофонных и спикерных кабелей с медными проводниками компания Belden использует только медь низкого сопротивления, полученную процессом ETP (Electrolytic Tough Pitch). Эта медь имеет чистоту 99,95%, и её проводимость соответствует стандарту ASTM B115. Высокая чистота, обеспечиваемая процессом ETP, позволяет добиться качества, сравнимого с бескислородной медью.

Таким образом, варьируя нестандартными сечениями и составом меди, некоторые производители получают ценовое преимущество до 30-50% по отношению к добросовестным конкурентам.

Сэкономить при желании можно не только на меди, а и на производстве из неё собственно проводников.

Одножильные и многожильные проводники

Проводники бывают одножильными и многожильными.

Одножильный проводник образует одна монолитная проволока. Кабель с такими проводниками относительно жёсткий и используется при фиксированном монтаже, где существенные и частые изгибы исключены. Представьте себе канцелярскую скрепку и то, как она гнётся, и вы получите представление об устойчивости к изгибам монолитного проводника. Типовое применение одножильных сигнальных кабелей (рис. 2) — телефонная разводка внутри помещения. Это самый экономичный способ получить нужные «квадраты» сечения при прочих равных условиях.

Многожильный провод включает в себя несколько монолитных проводников, свитых или собранных вместе (рис. 3). Например, 7 монолитных жил AWG 36 собираются вместе в пучок, чтобы сделать один многожильный проводник AWG 28. Чем больше в кабеле проводников, тем он гибче, тем меньше он оказывает сопротивление токам высоких частот вследствие поверхностного эффекта и тем он, соответственно, дороже.

Большинство приложений в электронике используют многожильный провод, сформированный из 7 монолитных проводников.

Скрутка проводников

Скрутка проводников тоже бывает разной. Самый дешёвый способ — это скрутка пучком (рис. 4). В этой скрутке отсутствует какой-либо геометрический рисунок. Положение каждого проводника случайно. В основном применяется в кабелях питания.

Более «продвинутой» способ скрутки — это концентрик. При скрутке концентрик проводники располагаются слоями. Позиция каждого проводника по отношению к соседям контролируется. Например, 19-проволочный проводник состоит из 12 проволок, навитых вокруг 6, которые в свою очередь навиваются вокруг одной центральной проволоки. Каждый последующий слой накручивается в противо-

положном направлении, чтобы избежать самораскручивания.

Если смириться с самораскручиванием (а это не только повышенный износ кабеля, но и дополнительные помехи, возникающие вследствие движения проводников относительно диэлектрика и друг друга), то можно применить компромиссный вариант — юнилэй (unilay), который является более простым в изготовлении, а следовательно, и более дешёвым. Это тот же концентрик, но все проводники всех слоёв закручены в одну сторону — по часовой стрелке или против неё.

Качество скрутки, точность изготовления вместе с однородностью диэлектрика напрямую связаны с помехозащищённостью витой пары — наиболее популярного в настоящее время кабеля передачи данных.

Витая пара: вопросы помехозащищённости

Подавление помех в витой паре основано на том, что электромагнитная волна помехи наводит в проводах витой пары синфазные напряжения (соответственно, и токи) одинаковой величины при наличии двух условий (рис. 5): первое — длина волны помехи много больше расстояния L между проводниками (условие синфазности), второе — комплексные сопротивления Z проводников по отношению к земле и другим цепям строго равны на всей длине линии в широком диапазоне частот. Полезный же сигнал передаётся одинаковыми противофазными напряжениями, которые затем усиливаются дифференциальными каскадами магистрального приёмника. Напряжение на выходе дифференциального усилителя пропорционально разнице напряжений сигналов на его входах. При поступлении равных напряжений на входы идеального дифференциального усилителя выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ будет равно нулю. Следовательно, если помеха наводит строго одинаковые сигналы на проводники витой пары в любой момент времени, тогда напряжение на выходе идеального диффе-



Рис. 4. Скрутка пучка проволоки

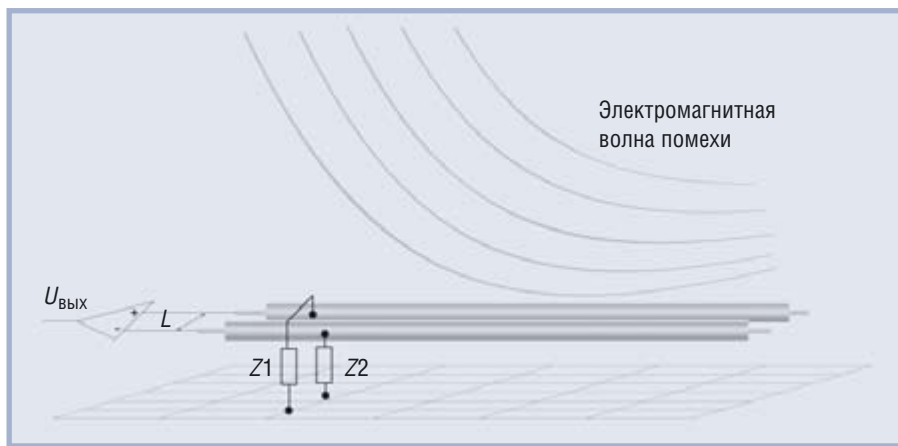


Рис. 5. Воздействие электромагнитной волны помехи на витую пару

ренициального усилителя всегда будет равно нулю.

Современные магистральные приёмопередатчики эффективно подавляют синфазный сигнал на 50-80 дБ и даже больше. Это означает, что десятки вольт синфазной помехи превратятся в доли процента аддитивной помехи милливольтного полезного сигнала. Но даже самый лучший дифференциальный приёмник ничего не сможет поделить с несимметричной кабельной системой. Даже сотня децибел подавления синфазного сигнала окажется бесполезной, поскольку на входы приёмника изначально придут сигналы помехи в разных фазах.

Не менее вредны отклонения волнового сопротивления витой пары от заданного, которые являются следствием всё тех же причин – неточности изготовления и неоднородности диэлектрических характеристик. При нагрузке витой пары на активное сопротивление, равное волновому (терминатор, встроенный в оконечное устройство), сопротивление витой пары становится активным в широком диапазоне частот, и линия переходит в режим бегущей волны. Это означает, что и форма сигнала, и фронты будут передаваться практически без искажений, установится оптимальный режим передачи энергии с одного конца кабеля на другой с минимальным затуханием (рис. 6). Если же волновое сопротивление витой пары отклоняется от номинального, на которое рассчитан терминатор, в линии появятся стоячие волны, а в её комплексном сопротивлении – реактивная составляющая (ёмкостная или индуктивная, в зависимости от физической длины кабеля). Как известно, любая ёмкость или индуктивность приводит к искажению формы сигнала и к затягиванию фронтов, а именно пологие

фронты являются причиной ложных срабатываний магистральных приёмников. Кроме того, режим передачи энергии становится неоптимальным, затухания возрастают. Ситуация усугубляется в случае излишних перегибов кабеля при монтаже и наличия резких поворотов кабельной трассы, приводящих к смещению проводников витой пары относительно друг друга, характерных для дешёвого кабеля.

Так что не стоит ожидать рекордной помехозащищённости, высоких скоростей и расстояний передачи данных от кабеля, изготовленного из сомнительного металла на разбитом отечественном или китайском оборудовании.

ВНЕШНЯЯ ОБОЛОЧКА КАБЕЛЯ И ВНУТРЕННЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Оболочка защищает внутренние компоненты кабеля во время хранения, монтажа и эксплуатации, придаёт внешний вид и обеспечивает устойчивость к горению.

Внутренняя изоляция изолирует проводник в кабеле механически и электрически.

Внешняя оболочка и внутренняя изоляция во многом определяют электрические и механические характеристики кабеля, их стабильность во времени и характер деградации в процессе старения, срок службы кабеля. Поэтому лидеры кабельной отрасли затрачивают огромные дополнительные средства и время на разработку рецептов своих собственных изоляционных материалов. Так,

компания Belden имеет не только собственные патентованные рецепты, но и зарегистрированные торговые марки на выпускаемые изоляционные материалы, например Flamarrest®, Datalene®, Haloarrest™, Tefzel™, Halar™, Solef™. Изоляционные материалы Belden обеспечивают превосходные эксплуатационные качества при воздействии разнообразных неблагоприятных факторов окружающей среды.

Кратко опишем свойства некоторых популярных материалов.

ПВХ (PVC)

ПВХ, или поливинилхлорид (в просторечии – «хлорка»), является наиболее традиционным изоляционным материалом, представляющим собой сложную смесь, свойства которой сильно зависят от состава. ПВХ – обычно эластичный и достаточно прочный материал, не горюч (IEC 60332-1, 2, 3C), однако имеет не слишком хорошие электрические параметры и используется в основном для кабельных оболочек. ПВХ не слишком хорошо сдерживает влагу и годится в основном для внутренней прокладки. Его температурный диапазон составляет от –20 до +60°C.

Тем не менее специальные составы ПВХ, изготовленные по оригинальной рецептуре Belden, могут иметь температурный диапазон от –55 до 105°C и использоваться для наружной прокладки (Belflex™, Oil resistant).

Полиэтилен (ПЕ, РЕ)

Полиэтилен, который ассоциируется с полиэтиленовыми пакетами и крышками в быту, обладает целой комбинацией выдающихся качеств, делающих его незаменимым в кабельной промышленности. Прежде всего, полиэти-

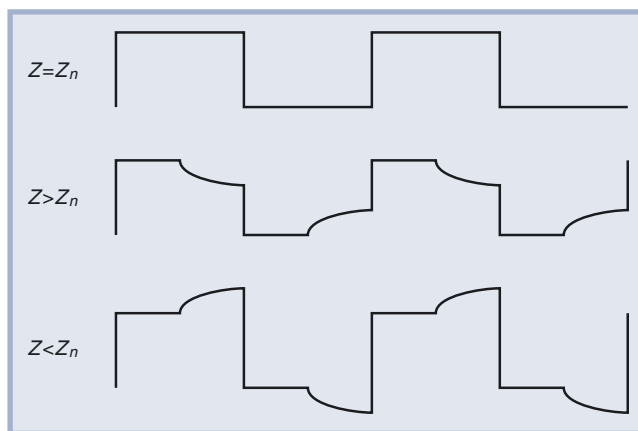


Рис. 6. Влияние отклонений волнового сопротивления кабеля от номинального на форму передаваемого импульса

лен имеет отличные электрические и механические параметры: он прочный и достаточно жёсткий, хорошо защищает от влаги, подходит для наружной прокладки, имеет широкий диапазон температур эксплуатации от -60 до $+80^{\circ}\text{C}$ — и всё это по вполне приемлемой цене. Но, к сожалению, полиэтилен очень хорошо горит.

Вспененный или сплошной полиэтилен часто используется как диэлектрик в коаксиальных кабелях.

Существует также хлорированный полиэтилен (ХПЭ, СРЕ), который обладает высокой химической стойкостью и к тому же не горит. Хлорированный полиэтилен имеет температурный диапазон от -35 до $+90^{\circ}\text{C}$.

Teflon® (фторопласт)

Teflon® является зарегистрированной торговой маркой фирмы Dupont. Этот материал тоже давно применяется в быту. Teflon (тефлон) — практически идеальный диэлектрик, обладающий исключительными электрическими параметрами, минимальными потерями в широчайшем диапазоне частот. Существует два вида тефлона: РТФЕ (фторопласт-4) и FEP. Тефлон обладает хорошими механическими параметрами, отлично защищает от влаги, термостоек, имеет температурный диапазон от -70 до $+200^{\circ}\text{C}$ и даже до $+260^{\circ}\text{C}$. РТФЕ практически не горит, является исключительно химически стойким, но сложен в производстве и обработке.

Belden изготавливает из тефлона пожаростойкие кабели, кабели, предназначенные для эксплуатации при высоких температурах в системах передачи данных, контрольно-измерительной аппаратуре, АСУ ТП и других коммерческих и промышленных применениях, а также кабели, предназначенные для прокладки между фальшпопалком и перекрытием без кабелепроводов (применение таких кабелей существенно сокращает время монтажа).

Безгалогенные негорючие компаунды (LSNH, LSZH, LSON)

Галогены — это чрезвычайно ядовитые, летучие и химически активные вещества, вступающие в реакцию практически со всеми простыми веществами. В связи с тем что галогены, интенсивно выделяющиеся при горении полимеров (до 180 л на 1 кг изоляции из ПВХ), являются основной причиной тяжёлых отравлений при пожарах, существуют международные нормы, ог-

раничивающие применение галогено-содержащих материалов в жилых и офисных помещениях.

Компания Belden разработала и производит на своих европейских заводах материалы с маркировкой LSNH (Low Smoke, No Halogen) — сложные безгалогенные компаунды, которые негорючи, при разложении не выделяют токсичных и вызывающих коррозию веществ, полностью удовлетворяют требованиям стандартов IEC 60332-1, 2, 3С, HD 624, HD 602. Кабели, изготовленные из безгалогенных компаундов, могут использоваться как для внутренней, так и для внешней прокладки. В номенклатуре Belden их легко отличить по суффиксу NH (например, 9463NH). Для маркировки подобных материалов наравне с LSNH могут

применяться сокращения LSZH и LSON (Low Smoke, Zero/0 Halogen).

Другие материалы

К другим материалам, используемым в диэлектриках и оболочках, относятся полипропилен (PP), похожий по свойствам на полиэтилен, полиуретан (PUR), имеющий хорошую химическую стойкость, резина и её заменители (EPDM — каучукоподобный этиленпропиленовый диэлектрический полимер, TPE, Neopren™, Nupalon™, каучук искусственный и природный), обладающие высокой эластичностью, широким температурным диапазоном, но плохими диэлектрическими свойствами.

Нововведением Belden является материал для производства оболочек

Таблица 1

Свойства материалов внутренней изоляции и оболочек кабелей

Свойства	PVC	LDPE	Вспененный полиэтилен	HDPE	Полипропилен	Вспененный полипропилен	PUR	Нейлон	CPE	LSNH	FEP Teflon®
Устойчивость к окислению	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5
Устойчивость к высоким температурам	3-4	3	3	4	4	4	3	4	4	3-4	5
Маслостойкость	2	3-4	3	3-4	2	2	4	4	4	3	4
Гибкость при низких температурах	1-3	4	4	4	1	1	3	3	4	2-3	5
Устойчивость к солнечным лучам и наружным погодным условиям	3-4	4	4	4	4	4	3	4	4	3	5
Устойчивость к озону	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Устойчивость к истиранию	2-3	3	2	4	2-3	2-3	5	4	4-5	2-3	4
Электрические свойства	2-3	4	4	4	4	4	1	1	4	3	4
Горючесть	4	1	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Радиационная стойкость	2	3-4	3	3-4	2	2	3	2-3	5	2	1
Влагостойкость	2-3	4	4	4	4	4	1-3	1-2	5	3	4
Устойчивость к кислотам	3-4	3-4	3-4	4	4	4	2	1-2	4	1-2	4
Устойчивость к щелочам	3-4	3-4	3-4	4	4	4	2	4	4	3	4
Устойчивость к алифатическим углеводородам (бензин, керосин и т.п.)	1	3-4	3	3-4	1-2	1	1-3	3	4	2	4
Устойчивость к ароматическим углеводородам (бензол, толуол и т.п.)	1-2	1	1	1	1-2	1	1-3	3	3-4	1-2	4
Устойчивость к галогенизированным углеводородам (обезжириватели, растворители и т.п.)	1-2	3	3	3	1	1	1-3	3	4	1	4
Устойчивость к спиртам	1-2	4	4	4	4	4	1-3	1	4	3	4
Возможность закапывания в землю	1-3	3	—	4	—	—	3	1	4-5	2	4

Примечания.

- Обозначения: PVC — поливинилхлорид; LDPE — полиэтилен низкой плотности; HDPE — полиэтилен высокой плотности; PUR — полиуретан; CPE — хлорированный полиэтилен; LSNH — безгалогенный негорючий компаунд; FEP — фторопласт.
- Принятые оценки: 1 — плохая; 2 — удовлетворительная; 3 — хорошая; 4 — превосходная; 5 — исключительная.

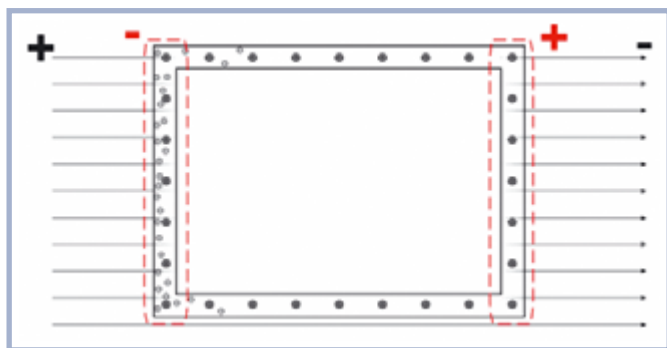


Рис. 7. Принцип компенсации воздействия внешнего поля в клетке Фарадея

Flamarrest®. Этот компаунд характеризуется плохой воспламеняемостью и малым выделением дыма, он в пять раз более гибкий, чем полимерный материал PVDF. Кабели в оболочке Flamarrest® недороги и просты в монтаже. В широкий перечень оригинальных компаундов для оболочек, запатентованных Belden, также входят Tefzel™, Halar™, Solef™ (все на основе фторопласта), Datalene® (пенополиэтилен), Haloarrest™ (негорючий безгалогенный материал).

Свойства упомянутых в этом разделе материалов для внутренней изоляции и оболочек кабелей приведены в табл. 1.

ЭКРАНИРОВАНИЕ

Способ экранирования электрического поля был предложен Майклом Фарадеем, который в 1836 году изобрёл свою знаменитую клетку. Принцип работы клетки Фарадея очень простой (рис. 7): при попадании замкнутой электропроводящей оболочки в электрическое поле её свободные электроны начинают двигаться под воздействием поля. В результате противоположные стороны клетки приобретают заряды, поле которых компенсирует внешнее поле. Строго говоря, клетка Фарадея защищает только от электрического поля. Статическое магнитное поле будет проникать вовнутрь. Но электромагнитная волна (в том числе волна от помех и наводок) образована из-за непрерывного взаимопорождения двух изменяющихся полей – электрического и магнитного. Этот процесс описывается уравнениями Максвелла. Изменяющееся электрическое поле создаёт изменяющееся магнитное, которое, в свою очередь, создаёт изменяющееся электрическое. Поэтому если с помощью клетки Фарадея блокируется изменяющееся электрическое поле, то изменяющееся магнитное поле генерироваться тоже не будет.

Однако в области высоких частот действие такого экрана основано на отражении электромагнитных волн от поверхности экрана и затухании высокочастотной энергии в его толще вследствие тепловых потерь на вихревые токи. Поэтому способность клетки Фарадея экранировать электромагнитное излучение определяется толщиной материала, из которого она изготовлена, глубиной поверхностного эффекта, соотношением размеров проёмов в ней с длиной волны внешнего излучения.

Поверхностный эффект – это известный из физики эффект вытеснения токов высокой частоты к поверхности проводника, приводящий к тому, что на высоких частотах реально работает только очень тонкий слой поверхности, а внутри проводника ток отсутствует вовсе. Идея биметаллических проводников основана на поверхностном эффекте и состоит в том, что дорогой высокопроводящий металл (например, медь) используется только для тонкого покрытия, а сам проводник изготовлен из прочной и дешёвой стали. Соответственно, качество поверхности и степень её окисления определяют электрические параметры проводников с током на высоких частотах.

Понятно, что для экранирования кабеля необходимо создать клетку Фарадея с хорошо проводящей поверхностью по всей длине экранируемых проводников. Вопрос только в том, как её изготовить максимально технологично, с минимумом затрат материалов, энергии, времени и рабочей силы.

Экран Beldfoil®

Компания Belden разработала и запатентовала простой и эффективный способ экранирования кабеля на осно-



Рис. 8. Технология Beldfoil® (оранжевым цветом показана фольга, синим — изолирующая полимерная плёнка)



Рис. 9. Замыкающая складка

ве слоя фольги, нанесённого на плёнку из полиэстера («полиэфирный сэндвич»). Способ получил название Beldfoil® (рис. 8).

С помощью технологии Beldfoil® компания Belden «убивает сразу двух зайцев»: во-первых, добивается гибкости и, что немаловажно, износостойкости экрана благодаря отличным механическим свойствам полиэстера, а во-вторых, обеспечивает идеальное качество его поверхности на протяжении всего срока службы кабеля, поскольку доступ кислорода воздуха к ней исключён.

Кабель с экраном Beldfoil® обязательно имеет медный лужёный дренажный провод, хорошо контактирующий с фольгой по всей длине кабеля. Дренажный провод позволяет легко заземлить экран и снять шумы и наводки, индуцированные в нём вследствие антенного эффекта.

Замыкающая складка

Технология Beldfoil®, как и всё в этом мире, имеет и свои недостатки. В классической реализации Beldfoil® клетка Фарадея получается незамкнутой, со щелью, хотя и очень узкой, в доли миллиметра. Тем не менее такая щель по всей длине кабеля существенно ухудшает параметры экранирования на высоких и сверхвысоких частотах вследствие «щелевого» эффекта.

Компания Belden предложила простое и красивое решение, добавив дополнительную складку при оборачивании проводников «полиэфирным сэндвичем». Эта складка надёжно замыкает экран по всей длине, устраняя «ще-



Рис. 10. Технология Z-FOLD®

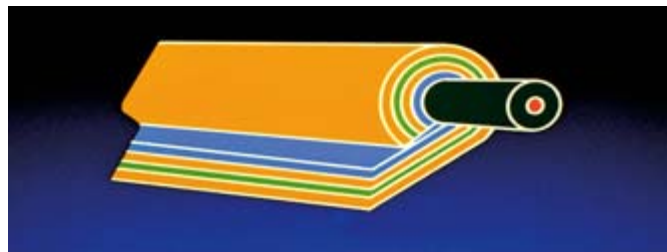


Рис. 12. Экран DUOBOND®

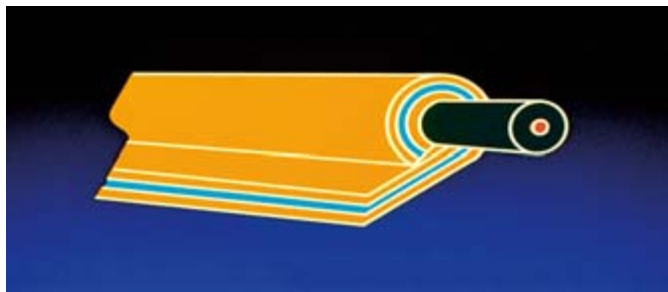


Рис. 11. Экран DUOFOIL®

левой» эффект и значительно улучшая АЧХ экрана (рис. 9).

Z-FOLD®

До сих пор мы рассматривали экранирование одной-единственной витой пары, тогда как современные интерфейсные и инструментальные кабели часто включают в себя несколько витых пар в общем либо индивидуальном экране.

Нужно сказать, что кабель не излучает и не поглощает внешнюю энергию, если сумма величин токов в любом его сечении в любой момент времени относительно общей шины (земли) равна нулю. Данное условие выполняется для витой пары, если передача осуществляется парафазным сбалансированным сигналом, как, например, это делается в интерфейсах RS-485 или Ethernet, и если по экрану не протекает синфазный ток относительно общей шины (земли).

Причин возникновения тока в экране может быть много, но наиболее просто получить значительный ток (единицы, а иногда десятки ампер при частоте 50 Гц) можно, заземлив экран кабеля с двух сторон, присоединив его к двум разным низкоомным землям. Опытные радиолюбители знают, чтобы микрофон не «фонил», экран нужно заземлять с одного конца. Так вот, если экраны в многопарном кабеле не будут изолированы, вам не удастся заземлить их с нужной стороны.

Вообще изоляции экранов кабелей передачи данных следует уделять не меньшее внимание, чем изоляции сигнальных проводников. Экраны не должны случайным образом касаться

корпусов, трубных проводок, фальшполов, элементов конструкций и т.п., иначе тяжело идентифицируемые сбои и потери производительности просто неизбежны.

Итак, вывод очевиден: экраны отдельных витых пар в качественном многопарном кабеле должны быть изолированы друг от друга и от внешней оплётки. Нет проблем с тем, чтобы одеть каждый экран в ещё одну оболочку, например из ПВХ. Но компания Belden решает задачу до гениальности просто, добавив ещё одну складку в свой «полиэфирный сэндвич» (рис. 10). Эту технологию назвали Z-FOLD®. Нелишне будет заметить, что только компания Belden обладает патентом на данную технологию и может применять её в своих кабелях.

Экран DUOFOIL®

«Полиэфирный сэндвич» из фольги с полиэстером позволяет создать превосходные варианты решений для экранирования кабеля. В компании Belden подумали, а что если добавить ещё один слой фольги в этот «сэндвич»? В результате получился экран DUOFOIL® (рис. 11), в котором использование дополнительного слоя фольги увеличивает надёжность экранирования и допустимое количество циклов изгиба кабеля, а также ставит дополнительный барьер помехам и уменьшает сопротивление экрана.

Экран DUOBOND®

Конструкция кабеля делает из него прекрасный капиллярный насос. Отрежьте достаточно длинный кусок обычной витой пары и поставьте один из её концов в стакан с водой. Посмотрите, как быстро кабель её «выпьёт». За короткое время вода заполнит все микропустоты кабеля. Это же произойдёт, если влага попадёт на участки кабеля с

повреждённой оболочкой или в негерметичные соединения.

Не нужно много объяснять, почему это плохо. Влага приводит к коррозии металлических частей и покрытий кабеля. Впрочем, для силовых кабелей этот процесс идёт сравнительно медленно, поскольку деградация характеристик кабеля вследствие коррозии идёт в основном за счёт уменьшения его сечения.

Совсем иначе обстоят дела для высокопроизводительных кабелей передачи данных. Как уже отмечалось, вследствие поверхностного эффекта на высоких частотах работают верхние слои проводника, а именно эти верхние слои проводника и покрытия первыми принимают на себя удар коррозии. Но ещё до окисления поверхностей проводников «поплывут» с попаданием влаги все диэлектрические характеристики изоляторов и волновые сопротивления. Последствия этого обсуждались ранее.

Однако всё сказанное справедливо для обычного кабеля, например изготовленного на заводе, производящем силовую кабель и решившем по-быстрому горизонтально интегрироваться в смежный бизнес кабелей передачи данных. Если же уделить вопросам влагозащиты достаточное внимание, подобных последствий можно избежать.

Компания Belden, добавив специальный адгезивный слой между проводником и экраном в своей патентованной технологии DUOBOND® (рис. 12), одновременно решила три задачи: во-первых, слой адгезии из несмачиваемого материала, заполнивший капилляры, решает проблему влагозащиты; во-вторых, этот слой обеспечивает более быструю, удобную и надёжную заделку кабеля; в-третьих, этот слой выполняет механическую функцию, обеспечивая целостность экрана. Ну и как всегда, всё скрыто в мелочах: фокус даже не в том, чтобы догадаться добавить подобный слой в кабель, а в его составе, который не должен влиять на электрические параметры кабеля в широком диапазоне частот.



Рис. 13. Оплётка

Оплётка

Говоря о способах экранирования кабеля, нельзя обойти вниманием самый традиционный из них – оплётку (рис. 13). Оплётка придаёт кабелю высокую прочность, гибкость, устойчивость к механическим воздействиям и множественным перегибам. Однако при выборе кабеля недостаточно просто удовлетвориться фактом её существования, а полезно поинтересоваться, какой процент поверхности покрывает оплётка (в изделиях Belden она обеспечивает покрытие от 40 до 98% поверхности кабеля), из какого материала сделана, чем покрыта. Тем более что и других отличий при совпадении перечисленных параметров хватает.

В качестве примера рассмотрим экран типа French Braid (французская оплётка). Это запатентованная Belden конструкция из двух встречных многоспиральных витков с чередующимся перехлёстом вдоль единственной смещённой оси (рис. 14). Она отличается от обычной оплётки, в которой перехлёсты равномерно распределены по поверхности. Французская оплётка обеспечивает улучшенный ресурс по количеству изгибов в сравнении со стандартными витыми экранами, повышенную гибкость в сравнении с традиционными экранами кабелей и более низкий уровень микрофонных и трибоэлектрических шумов, чем иные витые или традиционные экраны кабелей. Кабели с французской оплёткой проще оконцовывать, поскольку спирали легко расплетаются. Кроме того, эта оплётка имеет меньшее, чем обычный спиральный экран, сопротивление постоянному и переменному току.

Другой пример – спиральная оплётка (рис. 15). Она состоит из проводников, навитых спиралью вокруг изолированных проводников или ядра кабеля. Проводники оплётки, как правило, изготавливаются из меди. Спиральная оплётка обладает непревзойдённой гибкостью и

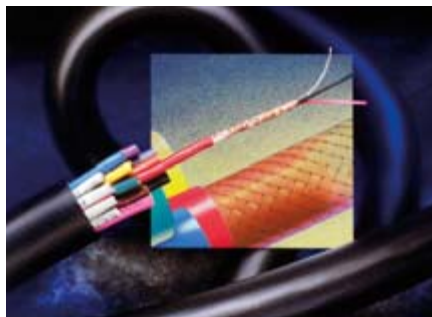


Рис. 14. Французская оплётка (French Braid)

устойчивостью к изгибу. Она обеспечивает покрытие до 97% экранируемой поверхности, легко заделывается и поэтому идеально подходит для аудиоприменений. Однако сравнительно высокая индуктивность ограничивает другие применения данного вида оплётки.

Так фольга или оплётка?

Так какому же методу экранирования следует отдать предпочтение: фольге или оплётке? Взглянем на зависимости коэффициента экранирования от частоты для фольги и оплётки, представленные на рис. 16.

На относительно низких частотах до нескольких десятков мегагерц оплётка обеспечивает лучшее экранирование, чем фольга, главным образом за счёт своей толщины. Однако затем экранирующие свойства оплётки резко ухудшаются и становятся почти неприемлемыми ещё до частоты 100 МГц. В то же время фольга имеет плоскую АЧХ, сохраняя удовлетворительные экранирующие способности в очень широком диапазоне частот, вплоть до гигагерц.

В те времена, когда был изобретён первый коаксиальный кабель, имевший экран из оплётки, радиостанции вещали только в средне- и длинноволновом диапазоне, короткие волны считали бросовыми и непригодными для радиосвязи, а ультракороткие толь-



Рис. 15. Спиральная оплётка

ко исследовали. Даже каких-то 15-20 лет назад сантиметровый диапазон использовался главным образом для космической радиосвязи и РЛС, а частотный привод делали на тиристорах, формируя выходное напряжение из отрезков синусоиды с частотой 50 Гц. Сегодня всепроникающий частотный привод делают на высокоскоростных IGBT, формируя ШИМ с несущей частотой в десятки килогерц, обычный мобильный телефон излучает частоты 900 МГц или даже 1800 МГц, а технологии Wi-Fi, уверенно приходящие в цеха, уже добрались до 2,4...5,7 ГГц! Подставьте эти частоты в графики на рис. 16, и станет ясно, что эра кабелей с экраном из оплётки уходит в прошлое.

Осознавая всё это, компания Belden выпускает кабели, которые имеют два слоя экрана из фольги и оплётки, либо даже четыре слоя, где фольга чередуется с оплёткой дважды, что позволяет сочетать в одном кабеле лучшие свойства фольги и оплётки (рис. 17).

Но дело не только в частоте наводки, а и в её характере. Вообще о наводках, паразитных связях, электромагнитной совместимости можно говорить вечно, но это не является темой данной статьи. По этой теме написаны трактаты, дающие иногда противоречивые рекомендации. От инженеров приходится слышать о том, что «Борьба с наводка-

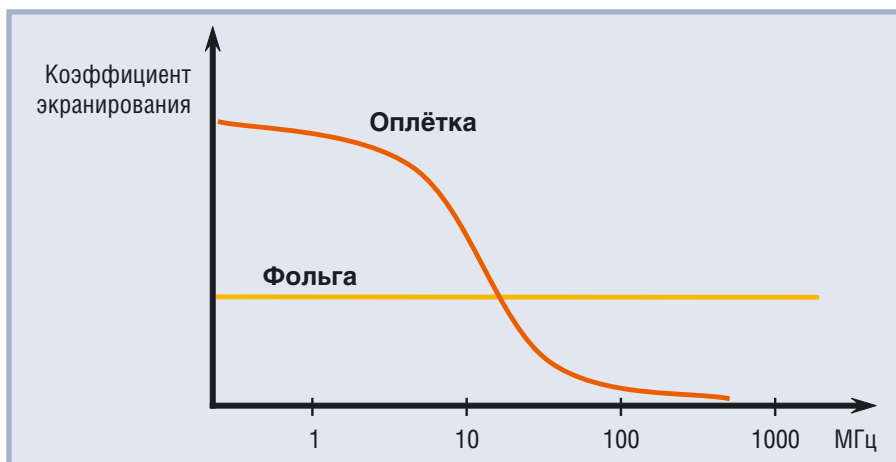


Рис. 16. Зависимости коэффициента экранирования от частоты для фольги и оплётки

Рейтинг кабельных экранов

Частотные диапазоны, типы помех	Оплётка (95% покрытия)	Спираль	Фольга	Фольга/оплётка	Фольга/оплётка/ фольга (Duobond Plus™)
Частота 0 Гц (постоянный ток)					
Ёмкостная	A	AA	AAA	AAA	AAA
Кондуктивная	AAA	A	C	AAA	AAA
Кондуктивная/индуктивная	—	—	—	—	—
Кондуктивная/индуктивная/ёмкостная	—	—	—	—	—
Частота 15 кГц					
Ёмкостная	A	AA	AAA	AAA	AAA
Кондуктивная	AAA	B	C	AAA	AAA
Кондуктивная/индуктивная	AA	C	A	AA	AAA
Кондуктивная/индуктивная/ёмкостная	—	—	—	—	—
Частота 10-1000 МГц					
Ёмкостная	A	AA	AAA	AAA	AAA
Кондуктивная	—	—	—	—	—
Кондуктивная/индуктивная	B	C	A	AA	AAA
Кондуктивная/индуктивная/ёмкостная	B	C	A	AA	AAA

Примечание. Принятые коды оценки: AAA — лучшая; AA — очень хорошая; A — хорошая; B — удовлетворительная; C — неудовлетворительная; «-» — неприменимо.

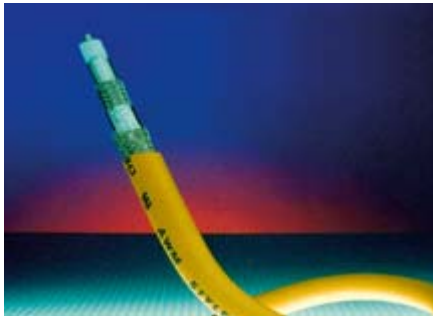


Рис. 17. Комбинация фольги и оплётки



Рис. 18. Бронированные кабели

ми — это не наука, это искусство». Если же с материалами проблем нет (табл. 2), то обеспечение помехоустойчивости и конфиденциальности передачи информации превращается в ремесло.

БРОНИРОВАНИЕ

Как уже говорилось, кабель должен иметь защиту не только от электрических воздействий, но и от механических повреждений при монтаже и эксплуатации. Дополнительную механическую защиту кабеля обеспечивает бронирование (рис. 18).

Бронирование осуществляется двумя основными способами: либо добавле-

нием слоя гофра из алюминия или стали, что принято в США, либо добавлением оплётки из стальных проволок, что характерно для Европы. Кабели с первым из перечисленных способов бронирования легко распознать в каталогах и прайс-листах Belden по префиксам «12» для алюминия и «13» для стали. Например, 129463 — это стандартный кабель 9463 с гофром из алюминия, а 139463 — тот же кабель, но с гофром из стали. Второй способ бронирования обозначается буквами LS. Например, 9463 LS — это тот же кабель 9463, но с броней из стальной оплётки.

ЗА ВСЁ НУЖНО ПЛАТИТЬ

Интересно рассмотреть вопрос изменения стоимости кабеля в зависимости от типа экрана (рис. 19). Если принять стоимость среднестатистического кабеля в оплётке за единицу, тогда точно такой же кабель, но со спиральным экраном будет в 3 раза дороже, а с экраном из фольги — дороже в 3,5 раза. Добавление дополнительных слоёв фольги и оплётки приводит к удорожанию кабеля более чем в 4 раза по сравнению с кабелем с одним слоем оплётки в качестве экрана. Поэтому при сравнении двух «почти одинаковых» витых пар, например для интерфейса RS-485, от разных производителей разница в цене более чем в 4 раза может быть обусловлена просто разными типами экранов в этих витых парах.

А НУЖНО ЛИ ИНВЕСТИРОВАТЬ В КАЧЕСТВО?

Это очень важный вопрос для любой компании независимо от того, использует ли она кабель в своей деятельности или нет. Мэтры современной теории бизнеса говорят о том, что делать качественную продукцию выгоднее, чем некачественную, поэтому она, как минимум, не должна быть дороже последней. Наверное, это справедливо, если исчислять стоимость правильно, учитывая чистую приведённую стоимость всех расходов за весь срок службы продукции и принимая во внимание такие

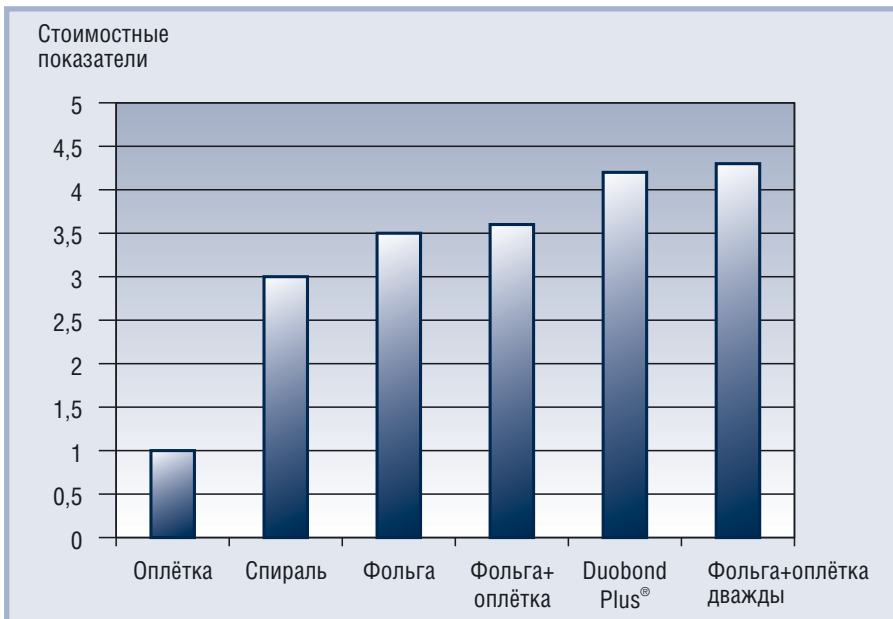


Рис. 19. Соотношение стоимостных показателей кабелей с различными типами экранов

тяжело поддающиеся оцениванию показатели, как стоимость деловой репутации и имени компании.

Однако и у системного интегратора, стремящегося к победам в тяжёлых тендерах, и у предприятия, пытающегося поместиться в жёсткие рамки бюджета, есть мощный стимул сэкономить сейчас вместо экономии когда-либо потом. Тем более что, как уже было показано, экономить есть на чём и экономить можно в разы. Поэтому решение данного вопроса является сугубо индивидуальным для каждого случая и для конкретной компании. Здесь же просто перечислим и кратко прокомментируем те выгоды, на которые можно рассчитывать, используя качественный кабель.

1. Долговечность. Качественный кабель служит в разы дольше. На сайте компании Belden приведены результаты исследований по деградации характеристик кабелей различных производителей в процессе эксплуатации из-за старения. Кабели компании Belden демонстрируют исключительную стабильность своих характеристик во времени, причём это касается не только электрических характеристик, но и механических. Эти кабели со временем не деревенеют, не накапливают влагу, не растрескиваются на солнце. Поэтому их смело можно использовать даже во второй раз. Полезно бывает сравнить срок службы кабеля со сроком службы всего объекта, системы, где он применяется. Если срок службы объекта

или системы больше, оцените стоимость затрат на новый кабель, демонтаж и монтаж новых кабельных трасс, не забудьте добавить стоимость простоя оборудования, а также стоимость рисков из-за отказа кабеля. В общем получается, что сэкономить на кабеле может себе позволить только тот, кто анонимно выпускает одноразовые кипятильники.

2. Точность и чистота передачи сигналов.

Для инструментальных кабелей такие свойства обеспечивают получение чистых, не замусоренных помехами сигналов от датчиков. В результате не тратится время на дополнительную фильтрацию, ухудшающую динамические характеристики регуляторов, и можно точнее поддерживать требуемые значения технологических параметров, что благотворно отразится на качестве и себестоимости выпускаемой продукции.

3. Более высокая производительность.

Качественный кабель обеспечит более высокую пропускную способность сети как за счёт возможности работать на более высоких скоростях для простых последовательных протоколов, так и из-за отсутствия искажённых пакетов данных, требующих повторной пересылки, для сетей стандарта IEEE 802.3. Из практики известны случаи, когда производительность сети Ethernet уменьшалась в 5-10 раз за счёт появления «битых» пакетов в момент включения конкретного частотно-регулируемого

привода. Такие ситуации приводят, как минимум, к рассинхронизации данных, получению недостоверной информации и, как максимум, к отказам и зависаниям систем автоматики.

4. Большой радиус покрытия сети. С качественным кабелем можно надеяться, что максимальные расстояния между репитерами сети передачи данных, оговорённые стандартом, могут быть превышены. Конечно, этого нельзя гарантировать всегда и при любых условиях, но автору известны случаи, когда с помощью кабеля Belden удавалось для интерфейса RS-485 (максимальная длина по стандарту – 1,2 км) перекрыть расстояние более 3 км при приличной скорости передачи данных.

5. Высокая конфиденциальность передачи информации. Если кабель не воспринимает излучения извне вследствие высокого качества экранирования, следовательно, он и не излучает. Во многих приложениях это важно в целях недопущения несанкционированного съёма информации с линий связи.

6. Расширенная область применения.

Реализация некоторых проектов стала возможной только благодаря наличию качественной кабельно-проводниковой продукции с уникальными свойствами. Например, надёжная передача информации из ПЛК, расположенного в кабине мостового крана, стала возможной благодаря применению сверхгибкого кабеля для PROFIBUS компании Belden; многие приложения в металлургии, коксохимическом производстве требуют стойкости кабеля и к высоким температурам, и к агрессивной среде; многие проекты в атомной энергетике не состоялись бы, если бы не было радиационно-стойкого кабеля, устойчивого к воздействию борной воды.

Такие всемирно известные производители, как ABB, Rockwell Automation (Allen Bradley), Westinghouse, Emerson Process Management (Fisher-Rosemount), GE Fanuc, Honeywell, Invensys Foxboro, Limitorque, Matsushita, Mitsubishi, Modicon/Schneider AEG, Omron, Phoenix Contact, Siemens, Yokogawa, считают, что инвестировать в качество жизненно необходимо. Поэтому они сделали свой выбор в пользу качественных кабелей Belden. ●

E-mail: lapko@rts.ua