

Измерение параметров кабелей для искробезопасной полевой шины (FISCO).

Неразрушающий контроль кабелей произвольной длины

Д.В. Хвостов
генеральный директор¹
simpec@mail.ru

А.В. Кочеров
к.т.н., главный метролог²
info@analytic.ru

¹ООО «СИМПЭК», Москва, Россия
²ООО «Аналитик-ТС», Москва, Россия

Рассмотрены требования к электрическим параметрам кабелей искробезопасной полевой шины (FISCO), к первичным параметрам кабелей, к методам выполнения измерений. Установлено, что измерения индуктивности кабелей следует выполнять на образце с длиной не более 100 м. Такое ограничение исключает возможность неразрушающего контроля кабельной продукции. Проанализированы погрешности традиционного метода измерений первичных параметров. Предложены коэффициенты восстановления истинных значений индуктивности и емкости по результатам измерений образцов с длиной более 100 м. Представлены формулы, позволяющие определять параметры кабелей произвольной длины. Продемонстрированы результаты практических измерений кабелей.

Материалы и методы

Анализ нормативных документов. Анализ погрешностей измерений. Вывод формул. Экспериментальные исследования.

Ключевые слова

искробезопасная полевая шина, FISCO, параметры кабелей — индуктивность и емкость, RLC-измеритель, паспортизация и неразрушающий контроль кабельной продукции, анализатор систем передачи и кабелей связи AnCom A-7

Краткий обзор задач гармонизации нормативного обеспечения, используемого, в частности, при проектировании, установке и эксплуатации систем автоматизации нефтегазового производства в России, представлен в статье [1]. Практика производственного контроля, в основу которой положены проанализированные в обзоре документы, выявляет обстоятельства, сдерживающие внедрение системы норм. Настоящая работа направлена на исследование и расшивку «узких мест» или, как учил Голдратт, создатель теории ограничений, — на устранение ключевых системных ограничений.

Компании, производящие проектирование систем, монтаж и пусконаладку оборудования на площадках соответствующих категорий, стремятся обеспечить требования искробезопасности, руководствуясь выбранным коэффициентом безопасности и достаточно сложно определяемыми требованиями стандартов [2, 3] в отношении предельных значений емкости, индуктивности, сопротивления и соотношения L/R. Идеология оценки искробезопасности систем с кабелями связи кратко и емко раскрыта в работе [4], где инженерная модель сформулирована на основе параметров оконечных устройств, погонных параметров кабелей и максимально допустимой энергии возможного искрового разряда, не приводящего к печальным последствиям.

При выборе номенклатуры применяемых монтажных кабелей и топологии построения кабельных систем требуется знание соответствующих погонных параметров кабелей, которые при использовании в искробезопасных цепях должны лежать в определенных пределах ([3] — пп. 5.1а - 5.1с). Там же ([3] — п. 5.1е) задана предельная длина магистральных кабелей, составляющая 1000 м для оборудования группы IIC и 5000 м для группы IIB.

Кабельные заводы, выполняющие соответствующие поставки, стремятся обеспечить указанные требования, для чего вводят погонные параметры в перечень подлежащих обязательному контролю и в паспорт каждой единицы отгружаемой кабельной продукции.

Производители средств измерений (СИ) предлагают соответствующие RLC-измерители, уделяя особое внимание обеспечению точности измерения индуктивности при наличии значительного омического сопротивления. Действующие требования к СИ предписывают выполнять измерения на частоте $f_{изм} = 1000 \text{ Гц}$ приборами с инструментальной погрешностью не более $\delta_{ист} \leq \pm 1\%$ ([5] — прил. J).

Традиционный метод измерений погонных параметров

Образованная двумя последовательно соединенными токопроводящими жилами бифилярная обмотка¹ будет иметь индуктивность и сопротивление, диапазоны значений которых определяются фактической длиной кабеля и требованиями [3]. Емкость такой обмотки² так же будет зависеть от длины и допустимого диапазона [3]. При намотке на барабан (в бухту) кабеля с длиной 5...5000 м нетрудно определить диапазоны возможных значений измеряемых электрических параметров (таб. 1) и сопоставить их с возможностями, например, популярного RLC-метра E7-20 с основной погрешностью $\pm 0,1\%$.

Казалось бы, проблем с измерениями нет, так как измеряемые значения лежат далеко от краев измерительных диапазонов. Но существуют два неразрывно связанных друг с другом обстоятельства, определяющие некорректность применения методики измерения двухполюсника с сосредоточенными параметрами для измерения кабеля как системы с распределенными параметрами, что качественно можно выразить следующим образом:

- при измерении индуктивности закороченного на дальнем конце кабеля ток источника расходуется как на создание магнитного потока, так и на потери в сопротивлении жил и перезарядку емкости пары;
- напряжение источника, заряжающее дальний конец разорванной пары проводов при измерении емкости, вынуждено преодолевать индуктивное и омическое сопротивление проводников.

Некорректность непосредственного применения измерителя сосредоточенных параметров для контроля кабелей (системы с распределенными параметрами) может быть устранена ограничением длины измеряемого образца. Стандарты содержат соответствующие наставления. Так, описанный в п. 3.3.1 [6] метод 3, указывает на то, что погонная емкость кабеля должна определяться по измеренной рабочей емкости и при этом длина образца кабеля должна быть не менее 5 м. Однако в отношении измерения индуктивности стандарт [6] никакого метода не определяет. Этот пробел восполняет методика измерения индуктивности кабелей [7], но этот стандарт разработан для коаксиальных кабелей. Британский нормативный документ [8] предписывает определять погонную индуктивность путем деления измеренной рабочей индуктивности на длину образца кабеля. Длина кабеля согласно п. 4.2 [8] должна находиться в пределах 10...100 м.

¹Для измерения индуктивности выбираются две измеряемые токопроводящие жилы. Ближние концы подсоединяются к измерительному прибору. На дальнем конце жилы соединяются между собой (режим короткого замыкания — КЗ) с образованием бифилярной обмотки, что исключает макроиндуктивность, образующуюся при намотке кабеля на барабан.

²Для измерения емкости на дальнем конце соединение жил разрывается (режим холостого хода — ХХ).

Последнее требование крайне затрудняет выполнение неразрушающего контроля производимой кабельной продукции в условиях заводского ОТК, так как длина отгружаемых кабелей обычно превышает 100 м. Можно предположить, что такое ограничение длины удобно при проведении типовых и периодических испытаний на производствах с устойчивой системой управления качеством продукции, когда приёмо-сдаточные испытания не проводятся, а один раз в полгода или год осуществляются периодические испытания ограниченного числа образцов, отобранных из серийной продукции.

Однако в России принято проведение приёмо-сдаточных испытаний. Поэтому вопрос корректного определения максимального значения длины испытуемых образцов кабелей сохраняет актуальность, а применительно к контролю кабелей для искробезопасных цепей определяет саму возможность контроля и его эффективность.

Методическая погрешность традиционного метода измерений погонных параметров

Исследование причин введения ограничения на длину контролируемого образца легко выполняется расчетным путем с использованием математической модели кабеля [9], основанной на телеграфных уравнениях, вводящих само понятие погонных параметров³.

Расчет импеданса (полного или комплексного сопротивления) отрезка кабеля в условиях «холодного хода» (ХХ) $Z_{xx} = R_{xx} + jX_{xx}$ и «короткого замыкания» (КЗ) $Z_{кз} = R_{кз} + jX_{кз}$ в зависимости от длины кабеля позволяет определить отклонения от исходных величин первичных параметров R_0, L_0, G_0, C_0 их приближенных значений $\hat{R}_0, \hat{L}_0, \hat{G}_0, \hat{C}_0$. Эти приближенные значения определяются по измеренным значениям рабочего импеданса Z_{xx} и $Z_{кз}$.

Волновое сопротивление Z_c кабеля с параметрами R_0, L_0, G_0, C_0 как функция длины кабеля l , частоты f и нагрузки на дальнем конце Z_2 позволяет определить Z_{xx} и $Z_{кз}$ на основании заимствованных из [9] выражений (12.26)-(12.28), обозначенных здесь как (1)-(3):

импеданс кабеля, подключенного на дальнем конце к нагрузке с импедансом Z_2

$$Z_{вх} = Z_c \frac{Z_2 + Z_c th(\gamma l)}{Z_2 th(\gamma l) + Z_c} \quad (1)$$

импеданс при ХХ на дальнем конце ($Z_2 = \infty$)

$$Z_{xx} = \frac{Z_c}{th(\gamma l)} = R_{xx} + jX_{xx} \quad (2)$$

импеданс при КЗ на дальнем конце ($Z_2 = 0$)

$$Z_{кз} = Z_c th(\gamma l) = R_{кз} + jX_{кз} \quad (3)$$

Здесь:

волновое сопротивление кабеля

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (4)$$

коэффициент распространения $a + j\beta = \gamma = (R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)$ (5)

круговая частота

$$\omega = 2\pi f.$$

Погонная индуктивность представляет собой производную по длине l реактивной составляющей закороченной пары $X_{кз} = Im(Z_c th(\gamma l))$ при $l \rightarrow 0$. При малых значениях длины кабеля нелинейностью гиперболического тангенса в (2)-(3) можно пренебречь $th(\gamma l) \approx \gamma l$. Такое приближение существенно упрощает формулы (2) и (3) с учетом (4) и (5). И именно это обстоятельство позволяет оценивать погонные параметры непосредственно по измеренным рабочим значениям импеданса⁴:

$$Z_{xx} = \frac{Z_c}{th(\gamma l)} \approx \frac{Z_c}{\gamma l} = \frac{1}{l(G_0 + j\omega C_0)} \quad (6)$$

$$Z_{кз} = Z_c th(\gamma l) \approx Z_c \gamma l = (R_0 + j\omega L_0) l \quad (7)$$

Следует заметить, что в результате упрощения (замены гиперболического тангенса

его аргументом) отпадает необходимость решения системы уравнений (2)-(5), в которой индуктивные и емкостные свойства кабеля взаимоувязаны. Полученные выражения позволяют измерить погонную индуктивность только по результатам измерения импеданса в режиме КЗ — (8) и измерить погонную емкость только по импедансу в ХХ — (9):

$$\hat{L}_0 = \frac{X_{кз}}{2\pi f} \times \frac{1}{l} \quad (8)$$

$$\hat{C}_0 = \frac{B_{xx}}{2\pi f} \times \frac{1}{l} = -\frac{X_{кз}}{2\pi f (R_{кз}^2 + X_{кз}^2)} \times \frac{1}{l} \approx -\frac{1}{2\pi f X_{кз}} \times \frac{1}{l} \quad (9)$$

Но при практических измерениях длина конечна и поэтому измеренное значение погонной индуктивности (рис. 1) будет убывать с ростом длины, так как выражения (8)-(9) выведены для приближительного расчета⁵, а поэтому следует определить меру того, до

| Параметр | Требования ГОСТ Р МЭК 60079-27-2012 | | Диапазоны измерений Е7-20 |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| | пп. 5.1а-5.1с пределы погонных параметров кабелей при их использовании в искробезопасных цепях | п. 5.1е диапазоны возможных измеряемых значений для кабелей с длиной 5...5000 м | |
| Сопротивление | $R_0 = 3...150$ Ом/км | 0,015...750 Ом | $10^{-5}...10^9$ Ом |
| Индуктивность | $L_0 = 400...1000$ мкГн/км | 2...5000 мкГн | $10^{-11}...10^4$ Гн |
| Емкость | $C_0 = 45...200$ нФ/км | 0,225...1000 нФ | $10^{-15}...1$ Ф |

Таб. 1 — Диапазоны значений параметров кабелей

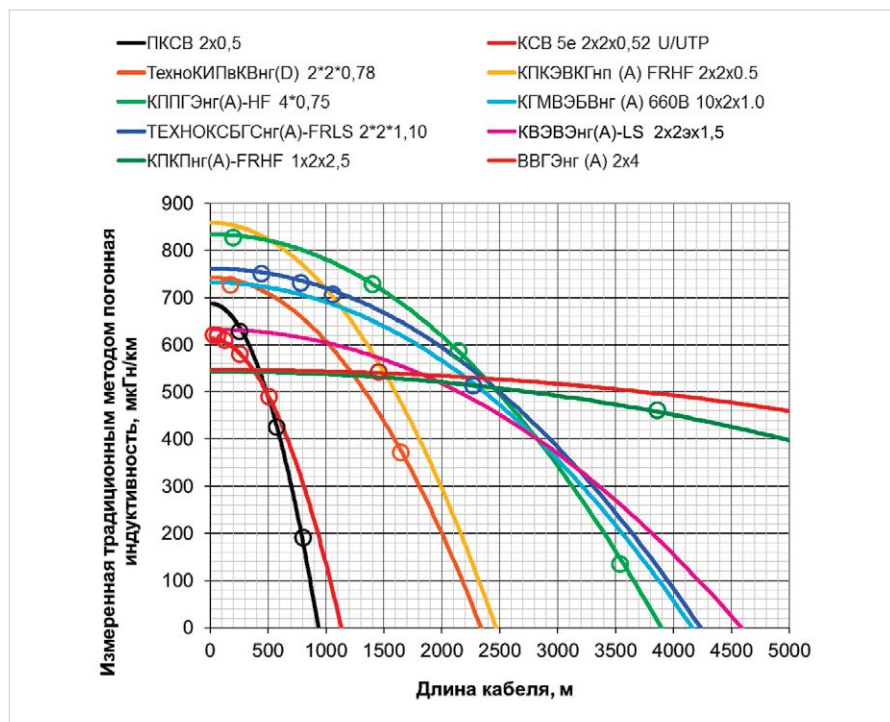


Рис. 1 — Зависимость измеренной на частоте 1000 Гц традиционным методом погонной индуктивности от длины кабеля; дополнительно даны точки, соответствующие практически измеренным кабелям

³Теория телеграфных уравнений разработана в 19-м веке У.Томсоном, Г.Кирхгоффом, О.Хевисайдом, А.Пуанкаре. Следует заметить, что вне теории телеграфных уравнений не существует как таковое понятие погонных параметров кабелей. Сама же по себе теория предполагает однородность кабеля и линейность его характеристик, но не исключает сколь угодно сложного характера протекания частотных характеристик первичных и вторичных параметров. Поэтому представляется логичным применить для измерения погонных параметров породившую их существование линейную теорию.

⁴Значительная часть экспертного сообщества, как показывает опыт авторов, убеждена в том, что это не приближительный, а точнейший расчет.

⁵Уже являющееся приближительным выражение для погонной емкости (9) часто дополнительно упрощают, приравнивая сопротивление $R_{кз} = 0$. Такое допущение соответствует использованию для изоляции жил идеального диэлектрика без потерь ($tg\delta = 0$), каковая «натяжка» может быть признана справедливой, но далеко не для всех на практике применяемых материалов.

каких пределов можно считать, что реальная длина кабеля искажает результат в допустимых пределах, то есть найти методическую погрешность традиционного метода. Для этого следует выполнить вычисления на заданной частоте $f_{изм}$ и в диапазоне возможных значений длины l .

Алгоритм расчета коэффициентов восстановления:

- пусть известны значения $R_{\rho}, L_{\rho}, G_{\rho}, C_{\rho}$ тогда
- по формулам (6) и (7) для известной длины l вычисляются Z_{xx} и Z_{xy} , затем
- по (8) и (9) определяются приближительные значения $\hat{L}_{\rho}, \hat{C}_{\rho}$

- вычисляются коэффициенты K_L, K_C восстановления исходного значения по измеренному традиционным методом приближительному значению; например, для индуктивности $K_L = I_{\rho} / \hat{L}_{\rho}$.

Результаты расчета коэффициентов восстановления значения погонной индуктивности K_L и емкости K_C представлены на рис. 2 и 3. Для большей иллюстративности расчет произведен для конкретных кабелей (таб. 2), различающихся площадью сечения жил⁶ S , и характеризующихся погонными параметрами, измеренными (рис. 4 и 5) именно для этих кабелей.

Если определить требование к методической погрешности соразмерно 1/3 заданной в [5] инструментальной погрешности $\delta_{инстр} < \pm 1\%$, то есть $\delta_{метод} < \pm 0,3\%$, то можно получить представление о предельной длине кабеля при измерении первичных параметров традиционным методом⁷ (рис. 6):

- предельная длина кабеля при измерении индуктивности практически прямо пропорциональна площади сечения жил, достигая 720 м при сечении 4 кв. мм;
- требование стандарта [8], вводящего ограничение на длину кабеля 10...100 м при измерении индуктивности, относится скорее к кабелям связи со сравнительно тонкими жилами, чем к монтажным;
- предельная длина кабеля при измерении емкости существенно больше длины по индуктивности, зависит от сечения жил сложным образом, но для монтажных кабелей распространенных сечений составляет 1600...2400 м, в то время, как длина кабеля на барабанах часто достигает существенно больших значений (таб. 3), а протяженность кабельных магистралей может достигать 1000...5000 м ([3] — п. 5.1е).

Несмотря на то, что значение измерительной частоты в стандартах фиксировано, было бы любопытно наблюдать зависимость предельной длины образца кабеля от частоты измерительного сигнала. Такие расчетные частотные зависимости для ряда кабелей представлены на рис. 7.

| Образец кабеля | Сечение жил S , кв.мм | Длина образца, м | C_{ρ} нФ/км | L_{ρ} мкГн/км | R_{ρ} Ом/км |
|-------------------------------|-------------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|
| ПКСВ 2x0,5 | 0,20 | 583 | 73 | 688 | 180 |
| КСВ 5е 2x2x0,52 U/UTP | 0,21 | 256 | 49 | 613 | 171 |
| ТехноКИПвКВнг(D) 2*2*0,78 | 0,37 | 2500 | 48 | 743 | 92 |
| КПКЭВКГнг (А) FRHF 2x2x0.5 | 0,50 | 2640 | 79 | 859 | 73 |
| КППГЭнг(А)-HF 4*0,75 | 0,75 | 2500 | 84 | 835 | 44 |
| КГМВЭБВнг (А) 660В 10x2x1.0 | 1,00 | 114 | 96 | 732 | 36 |
| ТЕХНОКСБГСнг(А)-FRLS 2*2*1,10 | 1,10 | 780 | 65 | 762 | 44 |
| КВЭВЭнг(А)-LS 2x2x1,5 | 1,50 | 197 | 165 | 633 | 23 |
| КПКПнг(А)-FRHF 1x2x2,5 | 2,50 | 3860 | 78 | 543 | 15 |
| ВВГЭнг (А) 2x4 | 4,00 | 1460 | 138 | 547 | 9 |

Таб. 2 — Параметры некоторых образцов кабелей, измеренные на частоте 1000 Гц

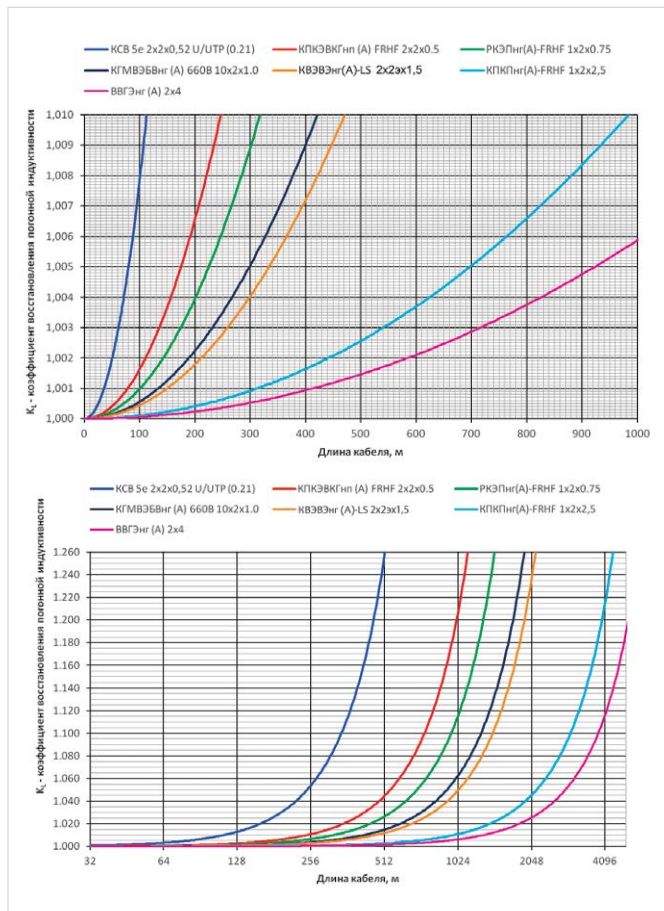


Рис. 2 — Коэффициент восстановления погонной индуктивности по значению, измеренному традиционным методом на частоте 1000 Гц: а) отклонение до 1%; б) отклонение до 26%

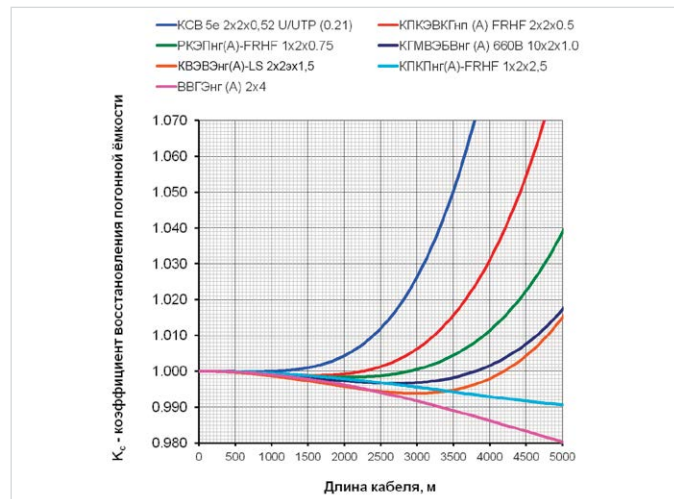


Рис. 3 — Коэффициент восстановления погонной емкости по значению, измеренному традиционным методом на частоте 1000 Гц



Рис. 4 — Некоторые образцы продукции, представленные к измерениям ОАО «Экспокабель»

⁶Для кабелей связи в коде обозначения обычно указывается диаметр токопроводящих жил, для монтажных кабелей — площадь сечения.

⁷Если на рис. 2а и 3 провести горизонтали по уровням 1,003 и 0,997, то точки пересечения с кривыми коэффициентов будут соответствовать предельной длине для нормы методической погрешности равной $\pm 0,3\%$. На рис. 6 дополнительно представлена предельная длина кабеля для погонного сопротивления, но не на постоянном токе (на постоянном токе ограничения по длине отсутствует), а на частоте 1000 Гц.

Произведенный анализ демонстрирует возможности усовершенствования и выявленные ограничения традиционного метода измерений первичных параметров кабелей, то есть при непосредственном использовании показаний RLC-метров:

- при измерении индуктивности стандарт [8] ограничивает максимальную длину измеряемого кабеля в пределах до 100 м; на самом деле диапазон допустимых длин кабельных образцов может быть значительно расширен, если учитывать площадь сечения жил (рис. 6);
- при измерении емкости стандарт [6] определяет только ограничение минимальной длины кабеля — не менее 5 м; ограничение предельной длины при измерении емкости наступает существенно позже ограничения по индуктивности (рис. 6), однако на практически реализуемых заводами строительных длинах более 2000 м может иметь место рост методической погрешности измерения емкости;
- вопреки ожиданию, снижение измерительной частоты от 1000 к 50 Гц не сопровождается увеличением предельно допустимой длины измеряемого кабеля, а парадоксальное кратное увеличение допустимой длины, наблюдаемое на частотах выше 1000 Гц, существенно зависит от параметров кабеля, каковой эффект при всей его «красоте» (рис. 7) не следует применять на практике;

- определение допустимых пределов измеряемых длин кабелей (рис. 6 и 7) и введение коэффициентов восстановления (рис. 2 и 3) совокупно позволяют квалифицированно подходить к задачам измерений и способствуют охвату неразрушающим контролем значительной части кабельной продукции, но не 100%.

Метод измерений погонных параметров на основе решения системы уравнений

Характер протекания графиков коэффициентов восстановления (рис. 2 и 3) достаточно прихотлив и зависит от конкретного

соотношения величин первичных параметров, а не только от сечения жил. К тому же практика кабельных заводов показывает, что в ряде случаев технически целесообразно и экономически выгодно отгружать кабели с длиной, существенно превосходящей ограничения, графически представленные на рис. 6. Поэтому для измерения погонных параметров следовало бы предложить более совершенный аппарат. Такой подход может быть основан на определении первичных параметров по измеренным вторичным.

Метод 6, рекомендованный стандартом [6] еще в 1988 г., определяет правила



Рис. 5 — Опытные измерения в зоне ОТК АО «Электрокабель» Кольчугинский завод»

| Кабель | | Метод измерений | | | | | | | Коэффициент восстановления по экспериментальным данным | | |
|--------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| S, мм ² | Обозначение | Длина, м | Традиционный (RLC-метр E7-20) | | | Системный (анализатор AnCom A-7/307) | | | K _c | K _L | K _R |
| | | | C _p , нФ/км | L _p , мкГн/км | R _p , Ом/км | C _p , нФ/км | L _p , мкГн/км | R _p , Ом/км | | | |
| 0,20 | ПКСВ 2x0,5 | 253 | | 629,79 | 180,16 | 74,74 | 673,5 | 179,92 | 0,9980 | 1,0694 | 0,9987 |
| | | 583 | | 425,65 | 180,21 | 73,30 | 688,1 | 179,65 | 0,9993 | 1,6166 | 0,9969 |
| | | 805 | | 190,97 | 179,91 | 72,06 | 687,9 | 179,66 | 1,0001 | 3,6021 | 0,9986 |
| | | 1058 | 72,58 | - | 179,97 | 72,75 | 674,2 | 179,76 | 1,0023 | - | 0,9988 |
| 0,21 | КСВ 5е 2x2x0,52 U/UTP | 32 | 46,71 | 620,75 | 174,16 | 46,69 | 620,50 | 174,08 | 0,9996 | 0,9996 | 0,9995 |
| | | 64 | 46,59 | 620,06 | 177,75 | 46,59 | 621,74 | 177,72 | 1,0000 | 1,0027 | 0,9998 |
| | | 128 | 48,93 | 608,15 | 166,67 | 48,92 | 615,79 | 166,66 | 0,9998 | 1,0126 | 0,9999 |
| | | 256 | 49,10 | 581,85 | 170,67 | 49,10 | 612,88 | 170,66 | 1,0000 | 1,0533 | 0,9999 |
| | | 504 | 48,51 | 493,68 | 170,07 | 48,51 | 613,64 | 170,04 | 1,0000 | 1,2430 | 0,9998 |
| 0,37 | ТехноКИПВКВнг (D) 2*2*0,78 | 175 | 48,02 | 724,57 | 94,34 | 48,08 | 731,77 | 94,71 | 1,0012 | 1,0099 | 1,0039 |
| | | 1645 | 47,82 | 370,82 | 92,09 | 47,66 | 735,90 | 92,53 | 0,9967 | 1,9845 | 1,0048 |
| | | 2500 | 48,12 | - | 91,86 | 47,99 | 742,73 | 91,76 | 0,9973 | - | 0,9989 |
| | | 4145 | 48,04 | - | 90,78 | 47,85 | 742,08 | 92,17 | 0,9960 | - | 1,0153 |
| 0,50 | КПСнг (A) FRLS 1x2x0.5 | 77 | 50,20 | 693,98 | 76,16 | 50,19 | 692,17 | 76,06 | 0,9998 | 0,9974 | 0,9987 |
| | | 2640 | 78,62 | - | 72,58 | 78,87 | 858,97 | 72,63 | 1,0032 | - | 1,0007 |
| 0,75 | КППГЭнг(A)-HF 4*0,75 | 200 | 92,29 | 827,85 | 45,49 | 91,65 | 827,47 | 45,63 | 0,9931 | 0,9995 | 1,0031 |
| | | 1400 | 84,40 | 728,57 | 44,33 | 84,23 | 835,22 | 44,25 | 0,9980 | 1,1464 | 0,9982 |
| | | 2140 | 85,07 | 586,45 | 45,12 | 84,40 | 847,11 | 44,91 | 0,9921 | 1,4445 | 0,9953 |
| | | 3540 | 85,82 | 135,03 | 45,06 | 84,47 | 849,64 | 44,69 | 0,9843 | 6,2922 | 0,9918 |
| 1,10 | ТЕХНОКСБГСнг (A)-FRLS 2*2*1,10 | 440 | 68,07 | 750,00 | 45,61 | 67,98 | 760,68 | 45,69 | 0,9987 | 1,0142 | 1,0018 |
| | | 780 | 64,86 | 734,10 | 44,18 | 64,52 | 762,25 | 44,28 | 0,9948 | 1,0383 | 1,0023 |
| | | 1050 | 69,00 | 704,29 | 44,63 | 68,80 | 755,45 | 44,56 | 0,9971 | 1,0726 | 0,9984 |
| | | 2270 | 72,80 | 511,89 | 45,17 | 72,38 | 764,98 | 44,95 | 0,9942 | 1,4944 | 0,9951 |
| 2,50 | КПСнг (A) FRLS 1x2x2.5 | 98 | 72,20 | 563,33 | 14,49 | 72,15 | 562,89 | 14,51 | 0,9993 | 0,9992 | 1,0014 |
| | | 3860 | 78,66 | 460,60 | 14,73 | 78,18 | 543,27 | 14,75 | 0,9939 | 1,1795 | 1,0014 |
| 4,00 | ВВГЭнг (A) 2x4 | 45 | 135,69 | 542,66 | 8,54 | 135,15 | 541,83 | 8,55 | 0,9960 | 0,9985 | 1,0012 |
| | | 1460 | 138,87 | 541,59 | 8,94 | 138,31 | 546,83 | 8,97 | 0,9960 | 1,0097 | 1,0034 |

Таб. 3 — Измеренные значения погонных параметров кабелей на частоте 1000 Гц

исчисления коэффициента затухания $\gamma = \alpha + j\beta$ и импеданса Z_c путем решения (2)-(3) как системы уравнений, в которых Z_{xx} и Z_{xc} — непосредственно измеренные значения импедансов:

$$Z_c = \sqrt{Z_{xx} Z_{xc}} \quad (10)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \text{Arth} \sqrt{\frac{Z_{xc}}{Z_{xx}}} \times \frac{1}{l} \quad (11)$$

Решая систему (4)-(5) в «обратном направлении» для определения первичных параметров по измеренным вторичным (10), (11), нетрудно получить выражения (12)-(15):

$$C_0 = \sqrt{-\frac{p}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}} \quad (12)$$

$$G_0 = \frac{2\alpha\beta a - b(\alpha^2 - \beta^2)}{2\omega(a^2 + b^2)} \times \frac{1}{C_0} \quad (13)$$

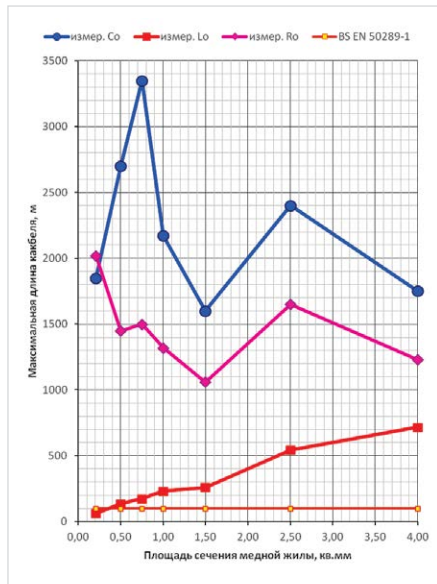


Рис. 6 — Зависимость предельной длины измеряемого на частоте 1000 Гц образца кабеля от площади сечения медных жил при использовании традиционного метода измерений первичных параметров по ГОСТ 27893-88 и BS EN 50289-1 и методической погрешности $\pm 0,3\%$

где

$$R_0 = aG_0 - b\omega C_0 \quad (14)$$

$$L_0 = \frac{bG_0 + a\omega C_0}{\omega} \quad (15)$$

$$p = \frac{2\alpha\beta b + a(\alpha^2 - \beta^2)}{(a^2 + b^2)\omega^2}$$

$$q = -b \left(\frac{2\alpha\beta a - b(\alpha^2 - \beta^2)}{2(a^2 + b^2)b\omega^3} \right)^2$$

$$\alpha = \text{Re} \left(\text{arth} \sqrt{\frac{Z_{xc}}{Z_{xx}}} \right) \times \frac{1}{l}$$

$$\beta = \text{Im} \left(\text{arth} \sqrt{\frac{Z_{xc}}{Z_{xx}}} \right) \times \frac{1}{l}$$

$$a = \text{Re}(Z_{xx} Z_{xc})$$

$$b = \text{Im}(Z_{xx} Z_{xc})$$

$$Z_{xx} = R_{xx} + jX_{xx}$$

$$Z_{xc} = R_{xc} + jX_{xc}$$

R_{xx} и R_{xc} — измеренные значения активного сопротивления, X_{xx} и X_{xc} — измеренные значения реактивного сопротивления.

Такой расчет лишен какой-либо методической погрешности, а вычислительная погрешность легко минимизируется использованием double-арифметики. Таким образом, общая погрешность определяется собственно инструментальной погрешностью измерения комплексных значений Z_{xx} и Z_{xc} , а измерение этих величин лежит в основе и ранее рассмотренного традиционного метода (8), (9).

Практика — критерий истины

В таб. 3 и на рис. 1 представлены результаты измерений первичных параметров кабелей разных типов, полученные с применением RLC-измерителя E7-20 (традиционный метод) и анализатора AnCom A-7/307 (рис. 8), поддерживающего оба рассмотренных метода измерений — и традиционный, и системный.

Данные, полученные расчетным путем (кривые на рис. 1), подтверждены результатами практических измерений конкретных кабелей (экспериментальные точки на рис. 1), а данные, полученные системным

методом (таб. 3), демонстрируют отсутствие тенденции к занижению измеренного значения погонной индуктивности при увеличении длины измеряемого образца.

Следует особо отметить результаты измерений протяженных кабелей:

- ПКСВ 2x0,5 — 1058 м,
- ТехноКИПВКвнг (D) 2*2*0,78 — 2500, 4145 м и
- КПКЭВКГп (A) FRHF 2x2x0.5 — 2640 м.

Длина перечисленных образцов оказалась столь велика, что характер образуемой ими реактивной нагрузки становится отрицательным (реактивная составляющая X_{xc} полного сопротивления имеет знак «минус»). Поэтому традиционный RLC-метр «видит» закороченный на дальнем конце кабель как емкость, а не как индуктивность. Это приводит к невозможности получения даже искаженной оценки индуктивности (именно поэтому в соответствующих клетках таб. 3 стоит прочерк). В то же время системный метод позволяет измерить погонную индуктивность столь длинных кабелей в бухтах и на барабанах.

Итоги

Показаны ограничения традиционного метода измерений погонных параметров с использованием RLC-метров. Приведены значения коэффициентов восстановления, позволяющие уточнить значения емкости и индуктивности по значениям, измеренным традиционным методом посредством RLC-метра. Получены алгоритм и формулы, позволяющие точно определить коэффициенты восстановления для любых кабелей.

Выводы

Представлен свободный от ограничения по длине образца кабеля — системный метод измерений. Продемонстрированы возможности получения неискаженных значений параметров кабелей с длиной до 5000 м по ГОСТ Р МЭК 60079-27-2012. Предложенный системный метод измерений:

- устраняет присущее традиционному методу ограничение максимальной длины

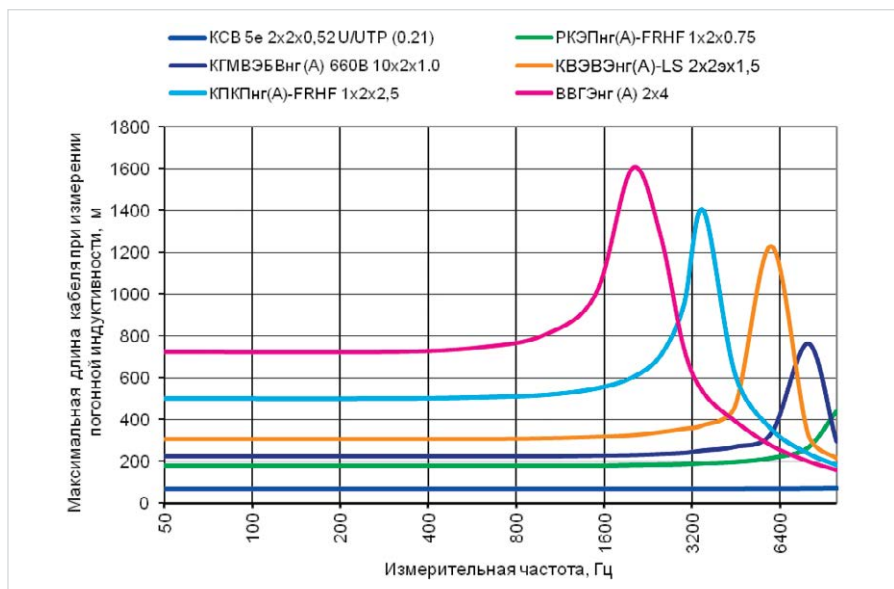


Рис. 7 — Частотная зависимость предельной длины образца кабеля при измерении погонной индуктивности традиционным методом по ГОСТ 27893-88 и BS EN 50289-1 и ограничении методической погрешности на уровне $\pm 0,3\%$



Рис. 8 — Анализатор систем передачи и кабелей связи AnCom A-7/307. Результаты измерений автоматически сопоставляются с заданными границами допуска и выводятся в протокол на русском языке

контролируемого кабеля, ранее установленного в стандарте равным 100 м при измерении индуктивности и определенного в ходе исследований равным 1600...2400 м при измерении емкости;

- обеспечивает возможность выборки любого барабана для контроля; при этом не нужно ни обращать внимания на длину кабеля на барабанах, ни отрезать от него для выполнения контрольных измерений кусок в 100 м;
- обеспечивает выполнение неразрушающего контроля погонной емкости, погонной индуктивности и соотношения L/R любых строительных длин кабелей, как в ОТК заводов, так и на площадках заказчиков;
- поддерживается серийно производимым анализатором AnCom A-7/307;
- позволяет измерять и сопоставлять с

нормами первичные и вторичные параметры (собственные коэффициент затухания и импеданс кабелей) в одном процессе.

Список литературы

1. Хвостов Д.В., Кочеров А.В. Кабели для искробезопасной полевой шины (FISCO). На пути гармонизации требований // Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 3. С. 94–96.
2. ГОСТ Р МЭК 60079-25-2012. Взрывоопасные среды. Часть 25. Искробезопасные системы.
3. ГОСТ Р МЭК 60079-27-2012. Взрывоопасные среды. Часть 27. Концепция искробезопасной полевой шины (FISCO).
4. Залогин А.С., Коган Э.Г., Малкович О.Б. Оценка искробезопасности систем с

кабельными линиями связи // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 54. С. 261–275.

5. ГОСТ IEC 60079-14-2013. Взрывоопасные среды. Часть 14. Проектирование, выбор и монтаж электроустановок.
6. ГОСТ 27893-88. Кабели связи. Методы испытаний.
7. IEC 61196-1-114 (2015). Кабели связи коаксиальные. Часть 1-114. Методы электрических испытаний. Определение индуктивности.
8. BS EN 50289-1. Communication cables – Specifications for test methods. Part 1-12: Electrical test method – Inductance.
9. Ионкин П.А. Теоретические основы электротехники. Т 1. Основы теории линейных цепей. Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: Высшая школа, 1976. 544 с.

ENGLISH

CABLES AND WIRES

Measurement of the parameters of cables for intrinsically safe Fieldbus (FISCO). Non-destructive control of cables of arbitrary length

UDC 621.315.2

Authors:

Dmitry V. Khvostov — general director¹; simpec@mail.ru

Andrey V. Kocherov — Ph.D., chief metrologist²; info@analytic.ru

¹SIMPEC, Moscow, Russian Federation

²Analytic-TS, Moscow, Russian Federation

Abstract

Electrical parameters of the cables of intrinsically safe Fieldbus (FISCO), the primary parameters of the cables, to methods of measurement were researched by authors. It is established that measurements of the inductance of the cables should be performed on the sample with a length of 100 m. This restriction eliminates the possibility of nondestructive testing of cable products. The error of the traditional method of measuring the primary parameters was analyzed. The proposed factors of restoration of the true values of inductance and capacitance on the measurement results of samples with lengths greater than 100 m. Presents formulas allowing defining the parameters of the cables of arbitrary length. In article were demonstrate the results of practical measurements of the cables.

Materials and methods

The analysis of normative documents. Analysis of measurement errors. The output formulas. Pilot study.

Results

It were shown the limitations of the traditional method of measuring linear parameters using RLC-meters. The values of factors of restoration, allowing to specify the values of capacitance and inductance values, the traditional method measured by RLC-meter were considered. The algorithm and formulas to accurately determine the coefficients of recovery for any cables were obtained.

Conclusions

We presented free from restrictions on the length of the sample cable is a systematic method of measurement. Also was demonstrated the possibility of obtaining undistorted values of the parameters of the cables with length up to 5000 m in accordance with GOST R IEC 60079-27-2012. Proposed system the method of measurement is:

- eliminates the inherent traditional method limits the maximum length of the monitored cable previously installed in the standard equal to 100 m in the measurement of inductance and defined in the research

is 1600...2400 m in the measurement of capacitance;

- provides the ability to sample any drum to control; no need to pay attention to the length of the cable on the drum, nor to cut off from it for clearance measurements a piece of 100 meters;
- ensures the implementation of non-destructive control of linear capacitance, running inductance, and the ratio L/R of any construction lengths of cables, as in RV factories and on the sites of customers;
- supported by a commercially produced analyzer AnCom A-7/307;
- allows you to measure and to compare with the norms of primary and secondary parameters (its own attenuation factor and the impedance of the cables) in one process.

Keywords

intrinsically safe Fieldbus, FISCO, parameters of cables are inductance and capacitance, RLC-meter, certification and non-destructive testing cables, the analyzer transmission systems and communication cables AnCom A-7

References

1. Khvostov D.V., Kocherov A.V. *Kabeli dlya iskrobepasnoy polevoy shiny (FISCO). Na puti harmonizatsii trebovaniy* [Cables for intrinsically safe fieldbus (FISCO). To harmonization requirements]. Exposition Oil Gas, 2014, issue 3 (35), pp. 94–96.
2. GOST R IEC 60079-25-2012 Explosive atmospheres. Part 25. Intrinsically safe systems.
3. GOST R IEC 60079-27-2012. Explosive atmospheres. Part 27: Fieldbus intrinsically safe concept (FISCO).
4. Zalogin A.S., Kogan E.G., Malkovich O.B. *Otsenka iskrobepasnosti sistem s kabel'nymi liniyami svyazi* [Evaluation of intrinsic safety of systems with cable communication lines]. Mining informational and analytical bulletin, 2006, issue 54, pp. 261–275.
5. GOST IEC 60079-14-2013. Explosive atmospheres. Part 14. Electrical installations design, selection and erection.
6. GOST 27893-88. Telephone cables. Methods of tests.
7. IEC 61196-1-114 (2015). Coaxial communication cables. Part 1-114. Methods of electrical testing. The definition of inductance.
8. BS EN 50289-1. Communication cables – Specifications for test methods. Part 1-12: Electrical test method – Inductance.
9. Ionkin P.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. T 1. Osnovy teorii lineynykh tsepey* [Fundamentals of electrical engineering, vol. 1. Fundamentals of the theory of linear circuits]. 2nd ed, revised and enlarged. Moscow: Vysshaya shkola, 1976, 544 p.