Импульсный контроль распределённой ёмкости, индуктивности и параметра L/R искробезопасных кабелей

Д.В. Хвостов
генеральный директор[1]

Е.М. Вишняков
старший преподаватель[2]

[1]ЗАО «СИМПЭК», Москва, Россия
[2]Озерский филиал МИФИ. Озерск, Россия

Разработаны импульсные методы прецизионного контроля первичных параметров кабелей связи C [Ф/м], L [Гн/м] и L/ R с учётом частотной зависимости C(f), L(f) и R(f), а также эффектов, связанных с распределённым характером СД, LД, RД (Д — длина кабеля).

Ключевые слова
измерение, кабели, индуктивность, ёмкость, искробезопасность, перекрёстные помехи

Традиционно для этого применяют аналоговые мосты (погрешность 1%), в которых исследуемый объект подключают к мосту в качестве одного из плеч. Мост балансируют на заданной частоте (1 КГц в [4]) подбором реактивности Y и активности X остальных плеч. И вычисляют L' = Y/ω, ёмкость C' = 1/ωY и/или сопротивление R' = X.

В ручном исполнении процедура весьма трудоёмка, а для автоматизации — не простая.

Но ещё хуже то, что в сфере кабелей это — скорее индикативные оценки [5]. То есть, даже если параметры C' ~ CD , L' ~ LD, R' ~ RD (где D — длина) кабелей измерили точно, то достоверность этих данных сомнительна.

С другой стороны, погрешность расчёта или измерения L' и/или C' около 2%, ведёт к двукратному промаху в оценке вероятности возникновения взрыва газообразных или пыле-воздушных взрывоопасных смесей в случае аварии кабеля [6, 7]. Это не приемлемо. Класс точности измерения C', L' и R' должен быть не хуже 0.1% . С учётом их распределённого характера и частотных зависимостей L и R. На первый взгляд, это невозможно. Ниже, однако, покажем, как можно решить эту проблему.

Укажем на некоторые причины упомянутого выше пессимизма в [5] . Низкочастотные измерения вообще проблематичны для получения L и L' с требуемой точностью. Так, на частоте 1 КГц ωL = 3...6 ‹‹ R = 15...150 Ом/км [2,5]. И потому ωL' — лишь малая часть (0.02 ... 8 %) полного импеданса $(R'^2 + \omega^2 L'^2)^{1/2}$ действующего в плече моста. Есть и ряд общих вопросов: в какой мере вообще низкочастотные C', L' и R' могут характеризовать работу широкополосного кабеля цифровой связи (10...1000 МГц [8]), где существенна частотная зависимость L и R? Или характеризовать его безопасность, если надо учитывать распределённый характер C', L' и R' [9] , а искровые процессы могут разворачиваться в течение микросекунд и быстрее [1, 10]?

И, наконец, самое важное. Из-за волновых процессов [11] даже точное знание L/R или L'/R' на низкой частоте не даёт достоверного знания о процессах развития искры-дуги при аварии, которые могут быть весьма запутанными в шинах промсвязи, содержащих десятки сегментов и ответвлений [2, 9, 12]. Так что импульсные явления в шине могут существенно отличаться от таковых у кабеля, из которого она была изготовлена.

Ключ к задаче — исследование (почти) свободного движения импульсного электромагнитного поля в линии (и шине). Для чего следует обеспечить слабую связь объекта с тестирующей информационно-измерительной системой — ИИС, содержащей источник импульсной энергии и цифровой осциллограф. Здесь это — генератор импульсов ГСПФ-052 и ЛА-н4 (блоки фирмы «Руднев-Шиляев» составе ПК). Входной импеданс ЛА-н4 2 Мом и 33 пФ (с шагом дискретизации в 2 нс) позволяет прямо подключать её к кабелю. А вот выходное сопротивление генератора 50 Ом — нет. И его подключали к кабелю либо через дополнительное сопротивление Rd = 1...10 КОм, либо к третьему проводнику для генерации перекрёстной помехи.

Цель работы — демонстрация возможностей импульсных методов контроля.

Импульсное исследование распределённой ёмкости кабеля

С этой целью к генератору через Rd = 6.25 Ком (рис. 1) подключали одну из жил витой пары ЛАН-кабеля категории 5е класса F/UTP (50.2 м длиной). Экран кабеля — заземлен. С точки зрения безопасности важно то, что ёмкость жила-экран больше ёмкости жила-жила пары. Помимо этого, методом конформных отображений (рис. 2) можно показать, что по топологии этот опыт совпадает с описанным в [13]. Что придаёт полученным здесь результатам смысл, выходящий за рамки безопасности, и заслуживает

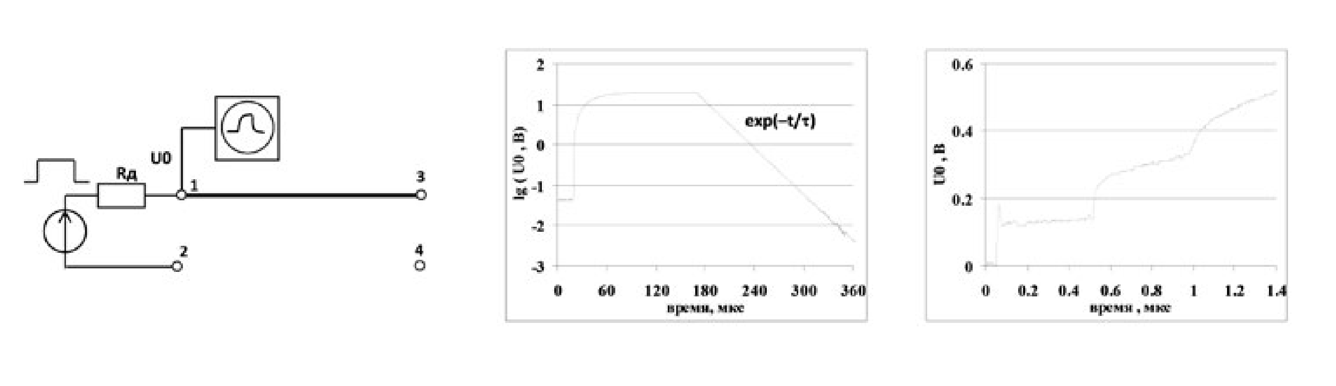

Рис.1 — Схема импульсного измерения CD по времени τ = RдC' заряд-разряда линии прямоугольным импульсом. Слева — осциллограмма в начале заряда C'. Здесь следует обратить внимание на ступенчатую структуру кривых. Справа — полная картина заряда-разряда в логарифмическом масштабе отдельного обсуждения. На рис. 1 представлена осциллограмма входного напряжения линии Uo(t). В целом она похожа на кривую заряд-разряда ёмкости в составе интегрирующей RC-цепи (но ступеньки «выдают» её распределённую природу):

$$U(t) = E\,(1-\exp(-t/\tau)) \quad \text{подъём}$$
$$(1)$$
$$U(t) = E\exp(-t/\tau) \quad \text{спад}$$

Здесь τ= 22.9 мкс получили подгонкой расчётных кривых (1) к наблюдаемым осциллограммам. Оно соответствует C' = τ/Rд = 3.66 нФ или 73.0 нФ/км (жила-жила — 48.2). Точность метода характеризует среднеквадратичное отклонение СКО = 0.3% расчёта от опыта. При этом не видно препятствий на пути к 0.2 и даже 0.1.

Отметим, что τ= 22.9 мкс соответствует полосе ~40 КГц, совпадающую с частотой промсвязи [2, 3]. Подбором Rд полосу можно расширить до ~1Мгц (или ещё вдвое больше, если контакты 1–3 и 2–4 на рис. 1 подключить к ИИС параллельно). Дальнейшее расширение полосы, как видно из рисунка, блокируют ступеньки t' = 2D/V = 0.23884 мкс (0.005% — получено прецизионным методом, заслуживающим специального обсуждения, равно как и метод измерения Z — волнового сопротивления по классу 0.1%). Ступеньки можно сжать, уменьшив D. И тут предела нет, но надо учитывать, что выше 100 МГц резко растёт роль паразитных реактивностей и помех.

Импульсное исследование распределённой индуктивности кабеля

На низких частотах короткозамкнутая линия работает подобно индуктивности. Её подключали через Rd к источнику пилообразного напряжения с амплитудой E и периодом T (рис. 3):

$$U(t) = (L'\,dJ/dt + R'\,J) = 2E/T\,[L' + t\,R']/(R_д + R') \quad (2)$$

Как видно из рис. 3 и выражения (2), входной сигнал кабеля U(t) состоит из постоянного напряжения (~L') и растущего (падающего) с наклоном ~R'. Кривая на рисунке получена в программной среде ELCUT. Минимум отклонения правдоподобия (2) от осциллограммы (СКО = 1.9%) обеспечивают L' = 25.75 мкГн (L = 0.515 мГн/км) и R' =16.4 Ом (R = 328 Ом/км). Это — слишком далеко от класса 0.1 , из-за малой мощности сигналов, так как ~L' ‹‹ R' и Rд. И она не устранима из-за ограничения: f ‹‹ V/4D .

Но, как указано выше, эта трудность преодолима. Если, помимо сигнальной пары, в кабеле есть хотя бы ещё один проводник («третий» проводник, который, как правило, есть в кабелях шин безопасной промсвязи), то импульсную энергию целесообразно ввести через такой проводник, гальванически не связанный с сигнальной парой (рис. 4). Так как мощность перекрёстной помехи назад Ao и вперёд A1 намного больше сигнала на рис. 3, что позволяет уверенно проследить спад Uo(t) ~exp(—t/τ) на протяжении ~3τ ((τ= L'/R' = 11.32 мкс) и обеспечить СКО = 0.4%, то открывается путь к 0.2 и даже к 0.1.

Таким образом, импульсные методы, либо решают поставленную задачу (в части измерений Z и V), либо открывают путь к измерению C, C', L, L', R/L с надлежащей точностью.

Обсуждение

Впрочем, из рис. 4 видно, что для оценок безопасности точные величины C', L', L/R необходимы, но недостаточны. Так как на участках их определений выделяются лишь проценты от W = C'U2/2 + L'J2/2, где U и J – напряжение и ток. А основная часть W линии действует на искру-дугу в первые микросекунды «после аварии» (на рисунке помечен стрелкой). Где линия ещё «не забыла», что она — распределённая, и где сосредоточен максимум вероятности подрыва горючих смесей [1, 11]. Так что, нельзя верить величинам C', L', L/R из-за возможности ошибочного занижения опасности, а это не приемлемо.

Не оптимально судить и по величине W. Так как в [13] сообщают даже о снижении энергии разряда при длине кабеля больше 4 км (при очевидном повышении общей W). И тут уже — завышение опасности.

Так что для адекватной оценки необходимо использовать не только C', L', L/R, а и весь массив данных, отображённых на рис. 4. Тем паче, что при этом автоматически учитывается частотная зависимость C, L, R, Z, V и распределённый характер C', L' и R'. Это, очевидно, справедливо для всей шины полевой связи, согласно [1, 2]. К тому же, необходимо учитывать многократные зажигания-гашения искры-дуги [13] и срабатывание (за микросекунды) быстродействующих искрозащитных барьеров [9].

И здесь не обойтись без детального анализа импульсного поведения отрезков кабеля строительных длин или кабельных сборок. И не только в заводских лабораториях, но и в смонтированных полевых шинах.

Следует также отметить, что обычно параметр C полагают не зависящим от частоты, так как теоретически тому есть существенные резоны. Но с точки зрения метрологии, этот факт всё равно следует устанавливать для каждого исследуемого кабеля.

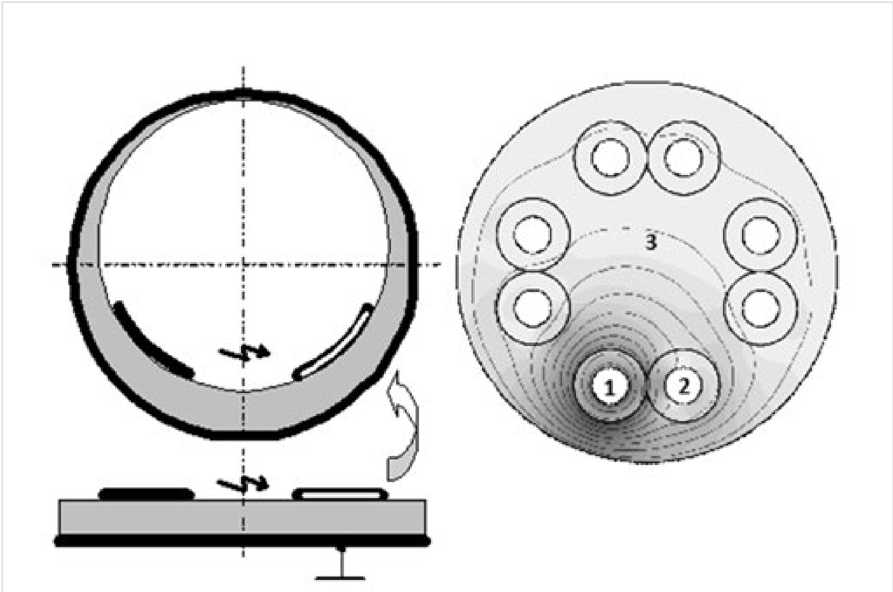

Рис. 2 — Поперечное сечение объекта в экспериментах по исследованию перекрёстных помех в печатных платах высокочастотных цифровых схем в [13] (внизу). Выше — конформное отображение, где нулевой (земляной) провод отображается в замкнутый цилиндрический экран. Справа — сечение ЛАН-кабеля с картой электрического поля заряда жилы 1

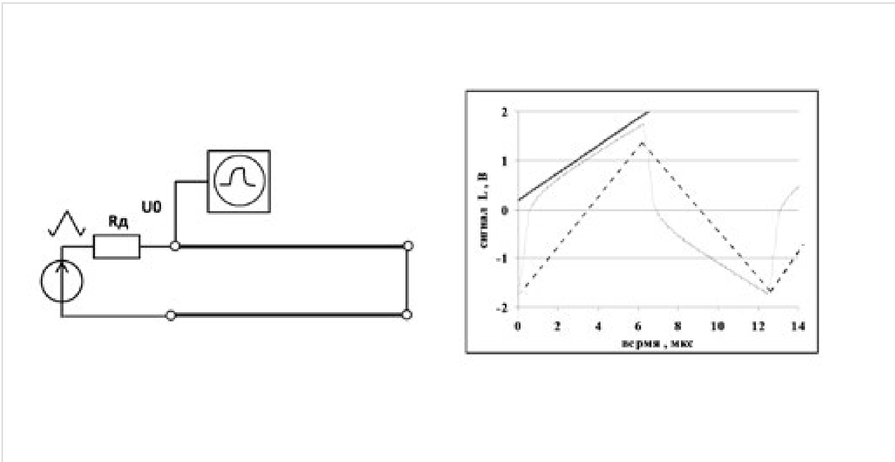

Рис. 3 — Входной сигнал КЗ при подаче пилообразного тока (пунктир, масштаб условный).
Следует обратить внимание на скачок сигнала, синхронный с изломом этого сигнала. Кривая — расчёт, точки — эксперимент

Итоги

Внимательный читатель может заметить, что заявленная в начале статьи «измерительная» программа C', L', L/R перешла в иное качество. Так как была установлена в общем-то очевидная вещь: параметры C, C', L, L', R , R' имеют разумный смысл лишь на протяжении достаточно больших интервалов времени и после ~10t' после импульсного (ударного) возбуждения линии. После затухания в ней свободных колебаний электромагнитного поля (рис. 1 и 5). Всё это снижает ценность достигнутых выше измерительных успехов в виде погрешностей 2% для L', 0.4% для L/R и 0.3% для C'. Так как в «чисто» связном деле такая точность обычно не требуется (допуск на Z = ±20 % [3], а то и вовсе никакого [2]), а на остальные параметры — допуск практически не нормируется).

Выводы

1. Разработаны точные импульсные методы исследования параметров кабелей, определяющие их искробезопасность, в том числе C, L, L/R, а также V и Z.
2. Методы учитывают частотные изменения параметров L, R, V, Z и C (если таковая есть), а также распределённый характер C', L' и R' этих кабелей.
3. Установлено, что этого недостаточно для точных оценок искробезопасности кабелей, применяемых в шинах промсвязи. Для этого необходимо привлекать весь массив данных, получаемых методами по п. 1.
4. Исследования показали необходимость применения этих методов не только в выходном заводском контроле безопасности кабеля, но и в составе подготовленной к эксплуатации шины промсвязи, отвечающей концепции ГОСТ Р МЭК 60079-27-2012.
5. Возбуждение перекрёстных помех в жилах кабелей позволяет исследовать (почти) свободное движения электромагнитных волн в кабелях в условиях, максимально приближенных к возникающим при авариях.

Список используемой литературы

1. ГОСТ Р 51330.10-99. Электрооборудование взрывозащищённое. Часть 11 Искробезопасная электрическая цепь «i».
2. ГОСТ Р МЭК 60079-27-2012 (ГОСТ Р 52350.27-2005, ГОСТ Р МЭК 60079-27-2008) Концепция искробезопасной системы полевой шины (FISCO) и концепция.
3. Foundation Fieldbus Application Guide. 31.25 kbit/s Intrinsically Safe Systems/ AG-181, Revision 2, 2004.
4. ГОСТ Р МЭК 60079-14-2011 Проектирование, выбор и монтаж электроустановок.
5. D4566 — 08. Standard Test Methods for Electrical Performance Properties of Insulations and Jackets for Telecommunications Wire and Cable. Rev. janu. 2012. Precision and Bias — The precision of this test has not been determined. No statement can be made about the bias of this ... test since the result merely states whether there is conformance to the criteria for success specified in the product specification.
6. Хвостов Д.В., Вишняков Е.М. Искробезопасность кабелей полевой шины. Энергетическое и электротехническое оборудование, технология // Сфера Нефтегаз. 2011. №3. с. 204–210.
7. Вишняков Е.М., Хвостов Д.М. О взрывобезопасности кабелей связи // Кабель-news. 2011. № 2. С. 58–64
8. ГОСТ Р 54429-2011 Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. Общие технические условия
9. Жданкин В. Применение fieldbus-систем во взрывоопасных зонах // СТА. 2006. №4. С. 76–80.
10. Ерыгин А.Т. Теоретические основы, методы и средства обеспечение искробезопасности рудничного электрооборудования. Диссертация. М.: ИП КОП АН СССР, 1987.
11. Залогин А.С., Коган Э.Г., Малкович О.Б. Оценка искробезопасности систем с кабельными линиями связи // Exinfo – Ехинфо. 2006. № 2. С. 24–30.
12. Жданкин В.. Dart fieldbus: искробезопасноть без ограничения мощности // СТА. 2011. №4. С. 6–10.
13. Джонсон Г., Грэхем М. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств. Начальный курс чёрной магии. М.: Вильямс, 2008.

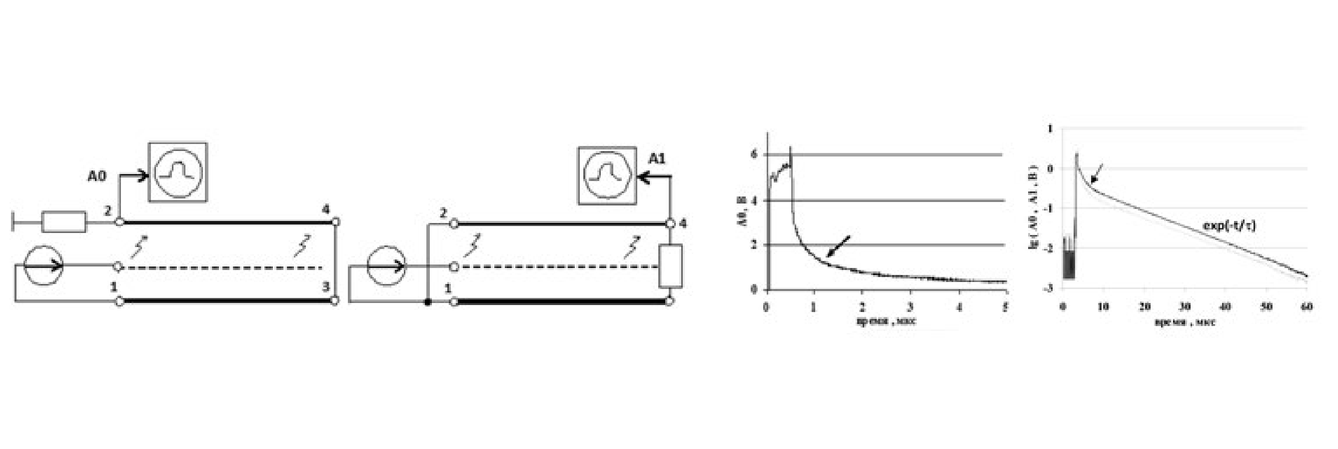

Рис. 4 — Схема наблюдений релаксации A0 и A1 в отрезке КЗ-линии с помощью третьего проводника (пунктир). Стрелкой обозначен участок, где существенен распределённый характер параметров LD и RD линии

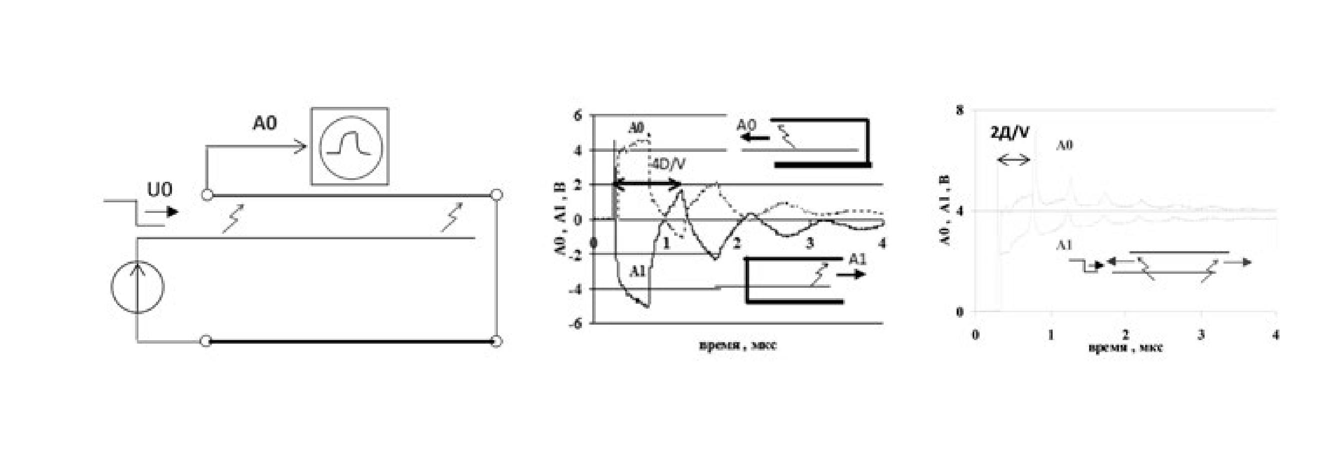

Рис. 5 — Свободное движение электромагнитного поля в линиях без концевых потерь после возбуждения с помощью третьего проводника

UDC 621.315.2

Impulse control of distributed capacitance, inductance and parameterless L / R intrinsically safe cable

Authors:
Dmitry V. Khvostov — general manager[1];
E.M. Vishnjakov — senior lecturer[2];

[1]SIMPEK. Moscow, Russian Federation
[2]Ozersky branch of National Research Nuclear University “MEPhI”. Ozersk, Russian Federation

Abstract
Developed methods precise control of the pulse parameters of the primary communication cables C [Ф/м], L [Гн/м], and L/R for the frequency dependence of the C (f), L (f), and R (f), and the effects associated with the distributed nature of CД, Д, RД (Д — length of cable).

Results
The careful reader will note that the announced at the beginning of the article "Measuring" program C', L', L/R has moved into a different quality.
Since been established , in general, the obvious thing : the parameters of C, C', L, L', R, R' have a reasonable sense only for a sufficiently long intervals of time and after ~10t' after the pulse (shock) excitation line. After the decay in her free oscillations of the electromagnetic field (Fig. 1 and 5). All this reduces the value of the success achieved in the above measuring errors as 2% for L ', 0.4% for L/R and 0.3% of C'.
Since for typical applications of the cable as a transmission medium in a "pure" really connected this accuracy is usually not necessary (tolerance
Z=± 20% [3] , or even none at all [2]) , and other parameters — tolerance almost normalized).

Conclusions
1. Developed accurate pulse methods of research parameters of cables, determining their intrinsic safety , including C , L, L/R, and V and Z.
2. Techniques include frequency changing parameters L, R, V, Z and C (if any), and the distributed character C ', L' and R' of the cables.
3. It is established that it is not enough for accurate estimates of intrinsic safety cables used in tires PROMSVYAZ. To do this, draw the entire array of data obtained by methods of claim 1.
4. Studies have shown the need for the application of these methods, not only in factory output control security cable, but also as part of a tire prepared fieldbus corresponding to the concept of IEC 60079-27-2012.
5. Excitation cross-talk in the veins of cables allows you to explore (almost) free movement of electromagnetic waves in the cables in conditions as close to emerging during accidents.

Keywords
measurement, cables, inductance, capacitance, intrinsic safety, crosstalk

References
1. GOST R 51330.10-99. *Elektrooborudovanie vzryvozashchishchennoe. Chast' 11 Iskrobezopasnaya elektricheskaya tsep' «i»* [GOST R 51330.10-99. Electrical apparatus. Part 11: Intrinsic safety «i»].
2. *GOST R MEK 60079-27-2012 (GOST R 52350.27-2005, GOST R MEK 60079-27-2008) Kontseptsiya iskrobezopasnoy sistemy polevoy shiny (FISCO) i kontseptsiya* [IEC 60079-27-2012 (IEC 52350.27-2005 , IEC 60079-27-2008) The concept of intrinsically safe fieldbus systems (FISCO) and the concept].
3. Foundation Fieldbus Application Guide. 31.25 kbit/s Intrinsically Safe Systems/ AG-181, Revision 2, 2004.
4. *GOST R MEK 60079-14-2011 Proektirovanie, vybor i montazh elektroustanovok* [IEC 60079-14-2011 design, selection and installation of electrical installations].
5. D4566-08. Standard Test Methods for Electrical Performance Properties of Insulations and Jackets for Telecommunications Wire and Cable. Rev. janu., 2012. Precision and Bias — The precision of this test has not been determined. No statement can be made about the bias of this ... test since the result merely states whether there is conformance to the criteria for success specified in the product specification.
6. Khvostov D.V., Vishnyakov E.M. *Iskrobezopasnost' kabeley polevoy shiny. Energeticheskoe i elektrotekhnicheskoe oborudovanie, tekhnologiya* [Intrinsically safe field bus cables. Energy and electrical equipment, technology]. *Sfera Neftegaz*, 2011, issue 3, pp. 204–210.
7. Vishnyakov E.M., Khvostov D.M. *O vzryvobezopasnosti kabeley svyazi* [On the explosion of communication cables]. Cable-news, 2011, issue 2, pp. 58–64.
8. *GOST R 54429-2011 Kabeli svyazi simmetrichnye dlya tsifrovykh sistem peredachi. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [symmetrical communication cables for digital transmission systems. General specifications].
9. Zhdankin V. *Primenenie fieldbus-sistem vo vzryvoopasnykh zonakh* [Application of fieldbus- systems in hazardous areas]. STA, 2006, issue 4, pp. 76–80.
10. Erygin A.T. *Teoreticheskie osnovy, metody i sredstva obespechenie iskrobezopasnosti rudnichnogo elektrooborudovaniya* [Theoretical foundations , methods and means of providing Intrinsically mine electrical equipment]. Moscow: *Thesis*, IP CPC of the USSR, 1987.
11. Zalogin A.S., Kogan E.G., *Malkovich O.B. Otsenka iskrobezopasnosti sistem s kabel'nymi liniyami svyazi* [Intrinsic evaluation systems with a cable communication lines]. *Exinfo*, 2006, issue 2, pp. 24–30.
12. Zhdankin V. *Dart fieldbus: iskrobezopasnot' bez ogranicheniya moshchnosti* [Dart fieldbus: Intrinsic Safety unlimited power]. STA, 2011, issue 4, pp. 6–10.
13. Johnson G., Graham M. *Konstruirovanie vysokoskorostnykh tsifrovykh ustroystv. Nachal'nyy kurs chernoy magii* [Construction of high-speed digital devices. The initial course of black magic]. Moscow: *Williams*, 2008.