УДК 004.383
DOI 10.62994/2072-215X.2024.32.72.001

# ТРИАКСИАЛЬНЫЙ КАБЕЛЬ С НИЗКИМ УРОВНЕМ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ

LOW SELF-NOISE TRIAXIAL CABLE

**M.A. Boev,** *Dr. Sc. (Engineering), Full member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, Professor, FSBEI NRU "MPEI";*
**A.V. Lobanov,** *Cand. Sc. (Engineering), Full member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, Chairman of the Board of Directors, Ltd. NPP Spetskabel;*
**R.G. Kuznetsov,** *Head of the Development Department – Chief Designer, Ltd. NPP Spetskabel;*
**G.I. Badamshin,** *Engineer, Ltd. NPP "Spetskabel"*

**М.А. Боев,** *д-р техн. наук, действительный член Академии электротехнических наук РФ, профессор, ФГБОУ НИУ «МЭИ»;*
**А.В. Лобанов,** *канд. техн. наук, действительный член Академии электротехнических наук РФ, председатель Совета директоров, ООО НПП «Спецкабель»;*
**Р.Г. Кузнецов,** *начальник отдела разработок – главный конструктор, ООО НПП «Спецкабель»;*
**Г.И. Бадамшин,** *инженер, ООО НПП «Спецкабель»*

**Аннотация.** В статье представлены характеристики триаксиального кабеля, разработанного для приборов, измеряющих параметры окружающей среды в системах контроля уровня ионизирующих излучений высокочувствительными приборами (дозиметрами) диагностики радиационного фона в помещениях или на площадках атомных электростанций, в рентгеновских отделах медицинских и прочих учреждений, а также использования в измерительных устройствах при воздействии механических воздействий.

**Ключевые слова:** триаксиальный кабель, радиация, диагностика, дозиметр, экранирование, электрические параметры, механические воздействия

**Abstract.** The article presents the characteristics of a triaxial cable designed for the devices measuring the environment parameters in ionizing radiation monitoring systems using high-sensitive instruments (dosimeters) to diagnose the radiation background in rooms or nuclear power plant sites, in X-ray departments of medical and other institutions, as well as for use in measuring devices under the exposure to mechanical influences.

**Key words:** triaxial cable, radiation, diagnostics, dosimeter, screening, electrical parameters, mechanical influences

*Автор, ответственный за переписку: Боев М.А.*
*E-mail: maboev@mail.ru*
*Материал поступил в редакцию 22.04.2024*

Для диагностики и контроля над радиационным фоном на атомных электростанциях или в медицинских учреждениях, где имеются рентгеновские отделения, применяют высокочувствительные приборы (дозиметры) для измерения уровня ионизирующих излучений.

Поскольку уровень измеряемых параметров и, соответственно, возникающих сигналов в таких устройствах может быть крайне низким, такие приборы очень восприимчивы к внешним электромагнитным и механическим возмущениям. Поэтому для соединения измерительной части прибора с датчиком применяют специальные кабели, которые лишены трибоэлектрического эффекта – наведения внутреннего заряда при механических деформациях и трениях в сердечнике кабеля, обладающим в то же время достаточной степенью экранирования от внешних электромагнитных полей.

Для таких прецизионных измерений слаботочных сигналов используют триаксиальные кабели повышенной помехоустойчивости, имеющие низкий уровень собственных шумов и повышенное экранирование от внешних электромагнитных полей. Потенциалы внутреннего проводника и внешнего проводника, выполненного в виде оплётки, при этом поддерживают на одинаковом уровне, что практически нивелирует токи утечки, невзирая на возможные дефекты изоляции. Токи утечки могут возникать между внешним

*Рис. 1. Общий вид кабеля марки РК 50-1,9-11-В*

проводником и экраном, однако это никак не сказывается на результатах измерений тока через внутренний проводник, который и подключают к исследуемому объекту.

На рис. 1 представлен общий вид триаксиального кабеля марки РК 50-1,9-11-В с низким уровнем собственных шумов, который изготавливают согласно ТУ 27.32.13-123-47273194–2022, разработанным ООО НПП «Спецкабель». Кабель соответствует требованиям ГОСТ Р 58416–2019 «Кабели радиочастотные. Общие технические условия». Аналогичные кабели выпускают за рубежом, например, кабель марки G-2330_HT, изготавливаемый фирмой Huber-Suhner (Швейцария).

Марка отечественного кабеля обозначает следующее: РК – радиочастотный коаксиальный; 1,9 – номинальный диаметр по первому слою изоляции по жиле, мм; 1 – сплошная изоляция обычной теплостойкости; 1 – порядковый номер разработки; В – класс экранирования.

Триаксиальный кабель марки РК 50-1,9-11-В, конструкция которого изображена на рис. 2, представляет собой коаксиальный кабель с экраном поверх поясной изоляции, придающим кабелю триаксиальную конфигурацию.

Особенностью триаксиального кабеля является экран, имеющий, как и внешний проводник, высокий коэффициент поверхностной плотности (не менее 92 %), который, будучи разделённым с внешним проводником слоем диэлектрика, обеспечивает повышенное экранирование за счёт отражений на границах раздела сред, в том числе при приложении к кабелю механических воздействий.

В случае триаксиальных кабелей, применяемых для высокочувствительных датчиков, в изоляцию между внутренним и внешним проводником вводится слой полупроводящего полимера. Основное назначение данного слоя – рассеивать наведённый электрический потенциал в сердечнике кабеля за счёт пониженного значения объёмного электрического сопротивления.

Разработанный триаксиальный кабель обладает тремя преимуществами по сравнению с зарубежным аналогом по основным эксплуатационным параметрам:

1. Внутренний проводник выполнен многопроволочным из семи скрученных проволок, с последующим уплотнением скрутки по длине (в аналоге – не уплотнён), что обеспечивает, наряду с сохранением гибкости, более плотное сцепление с изоляционным слоем и исключение пустот в проводнике, а значит и отсутствие механических внутренних сдвигов, приводящих к наведению паразитного заряда внутри кабеля.

2. Полупроводящий слой выполнен из саженаполненного полиэтилена (в аналоге – из полупроводящего ПВХ-пластиката), что обеспечивает более высокую стабильность электрических параметров кабеля и отсутствие галогенов в конструкции кабеля.

3. Оболочка кабеля выполнена из не распространяющего горения термопластичного полиуретана (в аналоге – из ПВХ-пластиката), не содержащего галогенов, что обеспечивает пожаробезопасность кабеля, при применении в том числе в местах, содержащих микропроцессорную технику. Кроме того, полиуретановая оболочка придаёт кабелю более высокую стойкость к климатическим и механическим воздей-

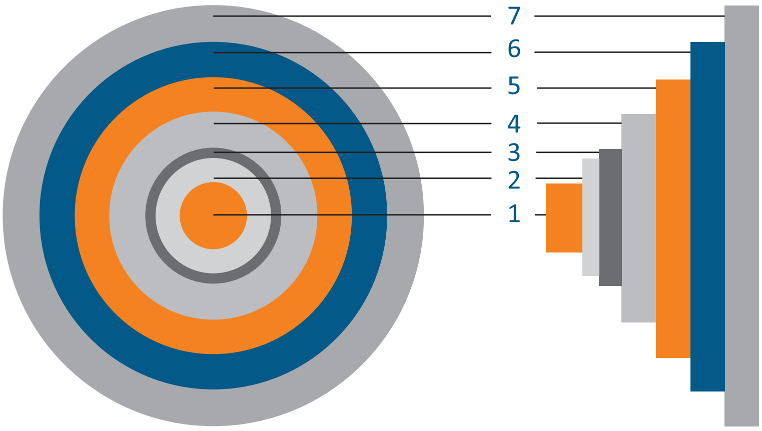


*Рис. 2. Конструкция кабеля марки РК 50-1,9-11-В:*

*1 – внутренний проводник многопроволочный уплотнённый из медной мягкой лужёной проволоки; 2 – изоляция из сплошного полиэтилена низкой плотности; 3 – полупроводящий слой из полимерной композиции с низким удельным объёмным электрическим сопротивлением (не более 100 Ом×см при температуре 20 $^0$С); 4 – внешний проводник в виде оплётки из медных проволок; 5 – поясная изоляция из сплошного полиэтилена низкой плотности; 6 – экран в виде оплётки из круглых медных проволок; 7 – оболочка из термопластичного полиуретана*

ствиям. В условиях ионизирующих излучений полиуретановая оболочка кабеля проявляет повышенную устойчивость, сохраняя механическую прочность при дозах в несколько сотен Мрад.

Измерение амплитудного значения напряжения электрического сигнала, возникающего при деформационных воздействиях между внутренним проводником и экраном, проводят на образцах кабеля длиной не менее 0,5 м при нанесении механического удара по образцам через резиновую прокладку толщиной 5–8 мм свободно падающим грузом массой 50±2 г с высоты 100±10 мм. Измерение амплитудного значения напряжения электрического сигнала проводят с помощью осциллографа с длительностью развёртки не менее 0,2 с.

При определении изменения фазы при однократном изгибе кабеля на 360$^0$ вокруг цилиндра один конец испытуемого образца кабеля соединяют с одним из портов векторного анализатора цепей, работающего в режиме измерения фазы отражённого сигнала (S11 или S22), производят измерение и фиксируют фазу отражённого сигнала испытуемого образца кабеля в исходном состоянии на частотах 200 и 1000 МГц. После чего свободный конец испытуемого образца кабеля плавно изгибают полным оборотом на 360$^0$ вокруг испытательного цилиндра, после чего образец выпрямляют и определяют изменение фазы на частотах 200 МГц и 1000 МГц. Кабель считают выдержавшим испытание, если ½ разности (изменения) между фазой испытуемого образца кабеля до изгиба и фазой испытуемого образца кабеля в исходном состоянии после изгиба на частотах 200 и 1000 МГц не превышает установленного значения.

В табл. 1 представлены основные электрические параметры кабеля марки РК 50 1,9-11-В.

*Таблица 1*

*Электрические параметры кабеля марки РК 50 1,9-11-В*

| Наименование параметра | Частота, МГц | Значение параметра |
|---|---|---|
| Электрическое сопротивление изоляции, пересчитанное на длину 1 м и температуру 20 °С, МОм, не менее | Постоянный ток | $1\times10^6$ |
| Волновое сопротивление, Ом | 10–200 | 50,0±2,0 |
| Коэффициент затухания, пересчитанный на температуру 20 $^0$С, дБ/100 м, не более | 200<br>1000 | 95,0<br>400,0 |
| Затухание отражения, дБ, не менее | 1–1000 | 20 |
| Сопротивление связи (для класса экранирования В), мОм/м, не более | 5–30 | 15 |
| Затухание экранирования (для класса экранирования В), дБ, не менее | 30–1000 | 75 |
| Испытательное напряжение изоляции переменного тока в течение 1 мин, кВ | $0{,}05\times10^{-3}$ | 1,0 |
| Изменение фазы, при однократном изгибе кабеля на 360$^0$ вокруг цилиндра диаметром 25 мм, $^0$ эл. | 200<br>1000 | 0,2<br>1,0 |
| Амплитудное значение напряжения электрического сигнала, возникающего при деформационных воздействиях между внутренним проводником и экраном, мВ, не более | – | 10 |

Кабель предназначен для стационарной эксплуатации с радиусом однократного изгиба радиусом не менее 5 наружных диаметров кабеля в диапазоне температур от минус 70 °C до 85 °C и при повышенной влажности воздуха до 98 %. Кабель стоек к воздействию ультрафиолетового излучения при прокладке на открытом воздухе, выдерживает воздействие минерального масла и дизтоплива, и не распространяет горение при одиночной прокладке. Минимальная температура монтажа кабеля – до минус 40 °C с радиусом многократного изгиба кабеля не менее 10 наружных диаметров кабеля.

Разработанный кабель марки РК 50-1,9-11-В прошёл испытания непосредственно у потребителя в составе устройства по измерению поглощённой дозы. Испытания позволили оценить основные функциональные свойства устройства с указанным кабелем – быстрота выхода электрометра на «Ноль», устойчивость к внешнему электромагнитному воздействию – наносекундной импульсной помехе в ёмкостных клещах, – результаты которых в сравнении с зарубежным аналогом рассматриваемого устройства представлены в табл. 2.

Наносекундные импульсные помехи, например, от переключения коммутационных устройств, дуговой сварки, работы двигателя постоянного тока, представляют угрозу чувствительному оборудованию. Устойчивость оборудования можно повысить, приняв меры по их снижению. Наносекундные импульсные помехи – это низкоэнергетические переходные процессы, которые распространяются вдоль цепи питания или излучаются от проводников с обеих сторон от коммутатора. Частота повторения разрядов изменяется от 10 кГц до 1 МГц. Продолжительность и время нарастания этих переходных процессов малы по сравнению со временем их распространения в проводной системе. Типичное время нарастания каждого разряда – менее 10 нс, а продолжительность – от десятков до сотен наносекунд; скорость распространения – примерно 5 нс/м.

Испытание на устойчивость к наносекундным импульсным помехам (схема испытательной установки показана на рис. 3) необходимо, чтобы подтвердить устойчивость оборудования при кратковременном воздействии описанной выше помехи.

*Таблица 2*

*Основные функциональные свойства устройства для измерения поглощённой дозы, в котором прошёл испытания разработанный кабель марки РК 50-1,9-11-В*

| Показатель | Устройство с кабелем марки G-2330_HT | Устройство с кабелем марки РК 50-1,9-11-В |
|---|---|---|
| Выход электрометра на «Ноль» | ~ 10 мин | ~ 1 мин |
| Устойчивость к наносекундной помехе в ёмкостных клещах 1 кВ + | Воздействие: 2,7 Е-14 эВ<br>Фон: 1,3 Е-14 эВ | Воздействие: 2,0 Е-15 эВ<br>Фон: 2,0 Е-15 эВ |
| Устойчивость к наносекундной помехе в ёмкостных клещах 1 кВ – | Воздействие: 1,1 Е-14 эВ<br>Фон: 1,0 Е-14 эВ | Воздействие: 2,0 Е-15 эВ<br>Фон: 2,0 Е-15 |
| Устойчивость к наносекундной помехе в ёмкостных клещах 2 кВ + | Воздействие: -4,1 Е-13 эВ<br>Фон: 1,0 Е-14 эВ | Воздействие: -2,0 Е-15 эВ<br>Фон: 2,0 Е-15 эВ |
| Устойчивость к наносекундной помехе в ёмкостных клещах 2 кВ – | Воздействие: -1,1 Е-13 эВ<br>Фон: 1,0 Е-14 эВ | Воздействие: -2,0 Е-15 эВ<br>Фон: 2,0 Е-15 эВ |
| Вывод по испытанию в ёмкостных клещах (группа исполнения технических средств, поставляемых на ядерно и радиационно опасные объекты народнохозяйственного назначения, в том числе, атомные станции) | Третья группа – соответствует | |
| | Четвёртая группа –<br>Не соответствует | Четвёртая группа –<br>Соответствует |

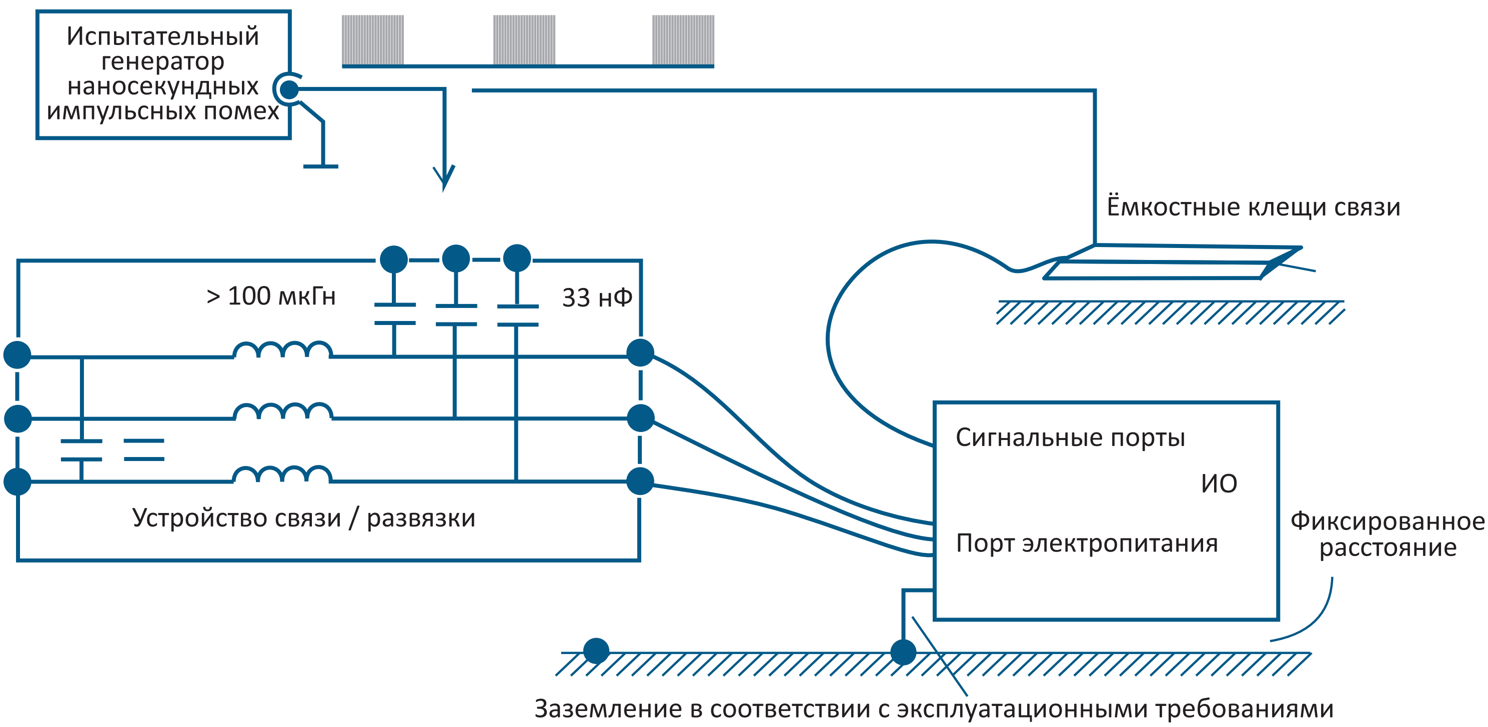


*Рис. 3. Схема установки для испытания на устойчивость к наносекундным импульсным помехам*

Импульс частотой 5 кГц продолжительностью 15 мс повторяется каждые 300 мс при общей длительности испытательного воздействия равной 1 минуте с изменением комбинации воздействий, полярности и уровня [1, 2].

Кабель подвергали воздействию наносекундных импульсных помех с помощью ёмкостных клещей связи, которые устанавливали над пластиной заземления на высоте 10 см, и кабель в них располагали между двумя плоскими металлическими пластинами, на каждую из которых подавали испытательный импульс относительно пластины заземления. Собственная ёмкость этого устройства составляла, примерно, 50–200 пФ.

Испытание проводили в составе устройства детектирования гамма-излучения БС-А02Д. Все исследуемые образцы кабелей имели длину 7 м. Один конец кабеля штатно подключали к измерительному входу устройства БС-А02Д. У второго конца снимали оболочку на расстоянии 3 см от края и кабель через ЭМС гермовод вводили в корпус дозиметра фонового излучения ИК ДБГ-С101Д. Наружный экран и внутренний проводник кабеля не подключали.

Таким образом, проведённые исследования подтверждают, что вновь разработанный триаксиальный кабель марки РК 50-1,9-11-В представляет собой эффективное решение для высокочувствительных приборов систем радиационного контроля. Параметры этого кабеля превосходят зарубежный аналог, обеспечивая надёжную эксплуатацию в условиях применения. Разработка является существенным вкладом в область технологий систем радиационного контроля.

## Список источников


1. **Уильямс Т., Армстронг К.** ЭМС для систем и установок. – М.: Технологии, 2004. С. 430–432, 484.
2. **Хренков Н.Н., Лобанов А.В., Кузнецов Р.Г.** Разработка и методы испытаний радиочастотных кабелей согласно рекомендациям стандартов МЭК. – М.: Филинъ, 2018. С. 176.


## List of References


1. **Williams T., Armstrong K.** EMC for systems and installations. – M.: Technologies, 2004. P. 430-432, 484.
2. **Khrenkov N.N., Lobanov A.V., Kuznetsov R.G.** Development and methods of testing radio frequency cables according to the recommendations of the IEC standards. – M.: Filin, 2018. P. 176.