

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 629.78.023

DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-5

*А. С. Ишков, А. С. Петров, Г. А. Солодимова, Д. В. Егоров*ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗИСТОРОВ  
В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ*A. S. Ishkov, A. S. Petrov, G. A. Solodimova, D. V. Egorov*THE RESEARCH OF THE RELIABILITY  
OF ELECTRONIC PRODUCTS UNDER  
THE INFLUENCE OF IONIZING RADIATION

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Объектом исследования являются резисторы, широко используемые в составе аппаратуры, которая в процессе своей работы может подвергаться различным видам радиационного излучения. Предметом исследования являются радиационные испытания резисторов для определения их способности сохранять значения параметров-критериев годности в пределах заданных норм в процессе и (или) после радиационного воздействия. Целью работы является разработка эффективных способов проведения радиационных испытаний резисторов с целью оценки их надежности. **Материалы и методы.** Для проведения исследований по радиационной стойкости резисторов применен экспериментальный метод, основанный на использовании моделирующих установок, представляющих источники радиационных воздействий, имеющих единую или близкую физическую природу и характеристики с радиационными факторами, воздействующими на резисторы в реальных условиях эксплуатации. **Результаты.** Предложена схема для измерения сопротивления резисторов при воздействии радиационного излучения. Получены осциллограммы изменения сопротивления резисторов в процессе воздействия гамма-излучения. **Выводы.** Получены данные о наличии резкого обратимого уменьшения сопротивления резисторов во время и непосредственно после облучения. Определены факторы, влияющие на надежность резисторов, и уровни снижения сопротивления при радиационном воздействии. Определено время потери работоспособности резисторов в условиях ионизирующего излучения.

**A b s t a r c t. Background.** The object of study are resistors that are widely used in equipment, which in the course of its work can be exposed to various types of radiation. The subject of the study is the radiation tests of resistors to determine their ability to preserve the values of the parameters-criteria of validity within specified standards in the process and (or) after radiation exposure. The aim of the work is to develop effective methods for conducting radiation tests of resistors. **Materials and methods.** To conduct research on the radiation resistance of resistors, an experimental method was used based on the use of modeling facilities representing

radiation sources that have a single or close physical nature and characteristics with radiation factors acting on the resistors in real operating conditions. **Results.** A circuit is proposed for measuring the resistance of resistors when exposed to radiation. Typical waveforms of changes in the resistance of resistors in the process of exposure to gamma radiation are obtained. **Conclusions.** Data on the presence of a sharp reversible decrease in the resistance of resistors during and immediately after ionizing radiation are obtained. The factors affecting the time of the loss of operability of the resistors and the degree of decrease in resistance during radiation exposure are determined.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** резисторы, надежность, испытание, сопротивление, ионизирующее излучение, радиационная стойкость.

**Key words:** resistors, reliability, testing, resistance, ionizing radiation, radiation resistance.

### *Введение*

Сложные системы, в том числе и технические, требуют обеспечения высокого уровня качества функционирования и надежности. Это требование становится особенно актуальным в случае, когда от работы системы зависит выполнение поставленной оперативно-функциональной задачи, сопряженной с опасностью потери человеческих жизней или значительных капитальных финансовых вложений. Под надежностью системы принято понимать свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность системы выполнять требуемые функции в заданных условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Увеличение числа выполняемых радиоэлектронными системами (РЭС) функций с одновременным ужесточением требований к качественным и количественным показателям требует существенного повышения качества и надежности комплектующих изделий, резисторы среди которых являются самыми используемыми. И, несмотря на снижение доли дискретных пассивных компонентов (резисторов и конденсаторов) в составе РЭС, их производство в настоящее время не только не уменьшается, но и увеличивается на 10–20 % в год и к настоящему времени составляет около 1 трлн шт.

В настоящее время перспективным является комплексный подход по обеспечению производства резисторов с высокими показателями надежности. Данный подход включает установление научно обоснованной связи между показателями надежности и электрофизическими параметрами резисторов, разработку эффективных методов испытаний, приближение испытательных режимов к эксплуатационным, использование средств измерений с высокими метрологическими характеристиками и автоматизированных испытательных установок, прогнозирование показателей надежности.

### *Постановка задачи исследования*

Ионизирующее излучение (ИИ) – это любое излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию неравновесных электрических зарядов разных знаков [1]. Ионизирующее излучение представляет собой поток заряженных и (или) незаряженных частиц, энергия которых достаточна для возбуждения и ионизации атомов вещества. Излучение, ионизирующее косвенно, состоит из незаряженных (нейтральных) частиц (нейтроны, фотоны), способных вызвать ионизацию вещества через вторичные заряженные частицы, образующиеся в результате взаимодействия первичных частиц с атомами среды [2].

Резисторы в процессе работы РЭС могут подвергаться облучению различными ионизирующими излучениями: электронами и протонами радиационных поясов Земли, космическими лучами, гамма-нейтронным излучением ядерных энергетических установок, излучением ускорителей частиц, рентгеновских и гамма установок, медицинских аппаратов.

Для оценки способности резистора выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм в процессе и после воздействия ИИ применяются показатели радиационной стойкости. Под радиационной стойкостью резистора понимается его способность восстанавливать свое сопротивление в процессе и после воздействия ИИ [2]. Эта спо-

способность зависит от конструкции резистора, применяемых материалов, а также уровня ИИ. Особенностью функционирования резисторов при их облучении является наличие так называемой временной потери работоспособности, которая может быть как обратимой, так и нет. Чем меньше время потери работоспособности резистора, тем выше его радиационная стойкость, а следовательно, и надежность.

В решении проблемы обеспечения качества РЭС значительная роль принадлежит испытаниям ее комплектующих, позволяющим установить соответствие изделий требуемым параметрам и выявить технологические недостатки [3]. Испытания комплектующих проводят для определения их способности сохранять свой внешний вид и значения параметров в пределах установленных норм [4]. Радиационные испытания резисторов являются одной из составляющих комплексной системы обеспечения качества РЭС.

### *Анализ методов исследования*

Радиационные испытания резисторов проводятся с целью определения и прогнозирования радиационных эффектов в процессе и (или) после радиационного или комбинированного воздействия (радиационного и температурного) на него, а также способности резистора сохранять значения параметров-критериев годности в пределах, установленных в нормативно-технической документации на аппаратуру или техническом задании на проведение радиационных испытаний.

Традиционными являются три основных способа проведения радиационных испытаний любого объекта испытаний [1].

Первый способ – натуральный, при котором на местности воспроизводится реальная радиационная обстановка, соответствующая возможным условиям применения объекта. В настоящее время, учитывая запрет на проведение ядерных натуральных испытаний в целях обеспечения безопасности людей и недопущения радиационного загрязнения местности, данный способ применен быть не может.

Второй способ – теоретический. Для использования данного способа необходимо наличие функциональных взаимосвязей между характеристиками ИИ и первичными радиационными дефектами, которые затем применяются для прогнозирования изменения соответствующих параметров объекта.

Третий способ основан на использовании моделирующих или имитирующих установок. Моделирующие установки представляют собой источники радиационных воздействий (изотопные гамма-источники, установки тормозного гамма-излучения, ускорители заряженных частиц), имеющие такие радиационные характеристики, которые могут воздействовать на изделия в реальных их условиях эксплуатации. В отдельных случаях при испытаниях используются имитирующие установки на основе лазерных и рентгеновских имитаторов, т.е. источники воздействий различной физической природы, обеспечивающие адекватное проявление и моделирование в изделиях доминирующих эффектов, вызываемых воздействием радиационных факторов в реальных условиях эксплуатации изделий.

Имитационные испытания обычно проводятся, когда отсутствуют соответствующие моделирующие установки, а также при отработке методик аттестационных испытаний в части выбора параметров-критериев стойкости, режимов и условий испытаний, при проверке применяемых технологических, конструктивно-топологических, схемотехнических и функциональных решений, направленных на снижение радиационной чувствительности изделий в процессе их разработки, при проведении периодических испытаний в условиях неритмичного производства и изготовления изделий малыми партиями.

Принципиальной особенностью проведения радиационных испытаний на моделирующих установках является дистанционный контроль регистрируемых параметров объекта в процессе и после облучения [1]. При этом для обеспечения дистанционного контроля применяются специализированные измерительные линии, учитывающие специфику моделируемого радиационного воздействия.

Авторами предлагается информационно-измерительной системы мониторинга параметров-критериев годности резисторов в процессе проведения радиационных испытаний с использованием моделирующей установки. Обобщенная структурная схема предложенной системы приведена на рис. 1. В ее состав входит моделирующая установка (МУ), испытываемые

резисторы (ИР), детекторы излучения (ДИ), блок питания (БП), дозиметр (Д), цепь синхронизации (ЦС), нормирующий усилитель (НУ), ПЭВМ/осциллограф.

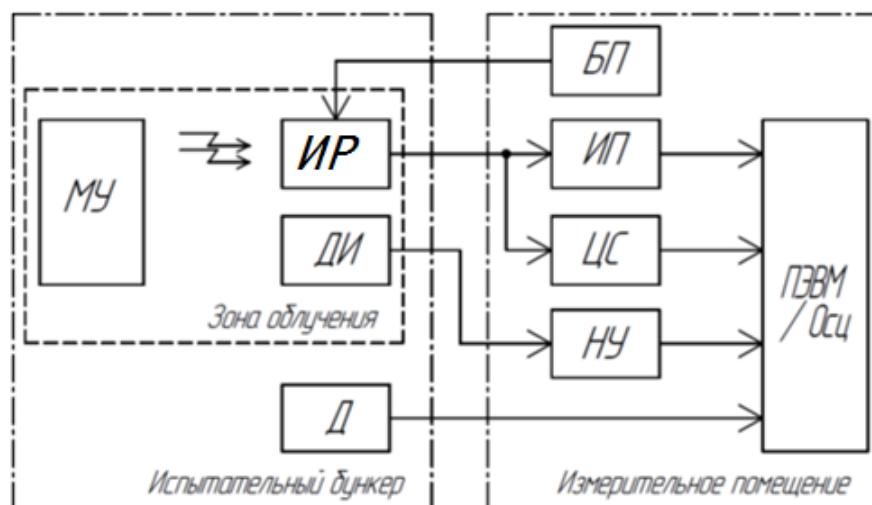


Рис. 1. Обобщенная структурная схема информационно-измерительной системы мониторинга параметров-критериев годности резисторов с использованием моделирующей установки

Испытуемые резисторы размещаются в зоне облучения, создаваемой моделирующей установкой. Моделирующая установка расположена в испытательном бункере. Дозиметр позволяет контролировать наличие биологической защиты, которая необходима для локализации моделируемых ионизирующих излучений внутри технологического помещения и обеспечения безопасности персонала и контрольно-измерительного оборудования, размещающихся в измерительном помещении. Предполагаемый уровень моделируемого воздействия задается с помощью картограмм полей излучения путем выбора расстояния от объекта испытаний до выводного узла МУ. Конкретное значение достигнутых при испытаниях уровней облучения определяется в процессе испытаний по показаниям детекторов излучения ДИ, тип которых зависит от моделируемого воздействия. Также при импульсном воздействии детекторы излучения ДИ формируют электрический сигнал, характеризующий форму моделируемого воздействия. Для синхронизации работы контрольно-измерительной аппаратуры и моделирующей установки используется цепь синхронизации.

С помощью БП по измерительной линии устанавливаются требуемые электрические режимы на испытуемые резисторы. Отклик на радиационное воздействие по измерительной линии поступает для регистрации на измерительные входы контрольно-измерительной аппаратуры. Наличие необходимой биологической защиты испытательного бункера ограничивает минимальную длину измерительных линий, что должно быть учтено при разработке методик проведения испытания конкретных испытуемых образцов с целью максимальной достоверности получаемых результатов. Отличительной особенностью проведения испытаний на некоторых моделирующих установках является наличие сопутствующих электромагнитных помех достаточно высокого уровня, поэтому используются специальные методы защиты измерительных линий от воздействия электромагнитных наводок [5].

На достоверность результатов радиационных испытаний и уровни радиационной нагрузки существенно влияет объем выборки испытуемых изделий [6]. Для подтверждения стойкости резисторов к воздействию ионизирующего излучения с заданной вероятностью сохранения параметров в пределах установленных норм необходимо оценить количество испытуемых резисторов  $N$  в выборке по следующей формуле: устанавливается в зависимости от условий обеспечения установленных в нормативно-технической документации значений вероятности  $p$  и степени доверия (доверительной вероятности, надежности)  $\gamma$  и определяется следующей формулой [7]:

$$N = \frac{\ln(1-\gamma)}{\ln p},$$

где  $p$  – вероятность сохранения параметров в пределах установленных норм, например,  $p = 0,95$ ;  $\gamma$  – степени доверия, например,  $\gamma = 0,9$ .

В соответствии с существующими нормативными требованиями в зависимости от определенного количества изделий  $N$  в выборке устанавливается соответствующий коэффициент увеличения радиационной нагрузки при испытаниях, который может изменяться в диапазоне от 1,0 до 2,24 [7].

### Результаты исследования

Авторами проведены исследования радиационной стойкости ряда образцов прецизионных сверхминиатюрных малоиндуктивных проволочных резисторов и фольговых наборов резисторов, широко используемых в узлах и блоках РЭС различного применения. Исследования были направлены на определение времени потери работоспособности изделий в условиях ИИ. Испытаниям подверглись различные образцы проволочных резисторов и фольговых наборов резисторов с номинальным сопротивлением от 10 до  $10^4$  Ом, номинальной мощностью рассеяния от 0,2 до 1 Вт и допуском отклонением от номинального сопротивления 0,01; 0,02; 0,05 %.

Для оценки надежности резисторов и наборов резисторов (далее изделий) в условиях ИИ используется параметр-критерий годности изделий – относительное отклонение сопротивления, которое измеряется до, в процессе и после радиационного воздействия.

Относительное отклонение сопротивления в результате радиационного воздействия на испытываемое изделие вычисляется по формуле [8]

$$\delta R = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot 100 \%,$$

где  $R_1$  – сопротивление резистора, измеренное до испытания;  $R_2$  – сопротивление резистора, измеренное во время или после испытания.

До испытаний значение сопротивления изделий измеряется с помощью цифрового омметра, который подключается непосредственно к выводам изделия. В процессе проведения испытаний для измерения сопротивления на соответствующие выводы изделия припаиваются соединительные провода, с помощью которых к изделию подключается омметр. При воздействии импульсного ИИ с уровнем до 4Ус, созданного МУ, с помощью осциллографа определяется изменение сопротивления резисторов в процессе воздействия. Схема измерения сопротивления испытываемого изделия ( $R$ ) приведена на рис. 2.

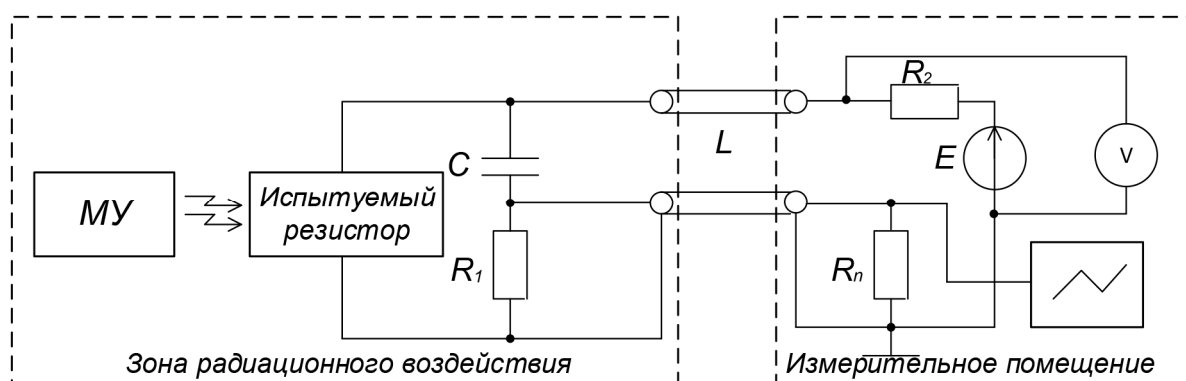


Рис. 2. Схема измерения сопротивления испытываемого изделия в процессе радиационного воздействия

Сопротивление резистора  $R_1$  и согласующей нагрузки  $R_n$  берется равным волновому сопротивлению кабельной линии  $\rho$ . Для предотвращения шунтирования согласующей нагрузки внутренним сопротивлением источника питания в цепь включается зарядное сопротивление  $R_2$  величиной от 1 до 5 кОм. Емкость разделительного конденсатора  $C$  (безиндуктивный керамический типа К15-5 или аналогичный) выбирается из условия минимального искажения регистрируемого сигнала цепью  $R_1 - C$ :

$$C \geq 10 \tau_n / R_n^*,$$

где  $\tau_n$  – эффективная длительность импульса радиационного воздействия;  $R_n^* = 0,5\rho$  – значение сопротивления для согласованной линии передачи сигнала.

Для контроля формы изменения значения сопротивления используется цифровой осциллограф. Резисторы подключаются к схеме измерения через соединительную линию ( $L$ ), в качестве которой используется радиочастотный кабель РК75(50). Вольтметр ( $V$ ) применяется для контроля уровня напряжения  $E$ , прикладываемого к испытуемому изделию ( $R$ ).

Полученные в результате проведенных испытаний осциллограммы изменения сопротивления резисторов в процессе воздействия мощности дозы гамма-излучения приведены на рис. 3 и 4.

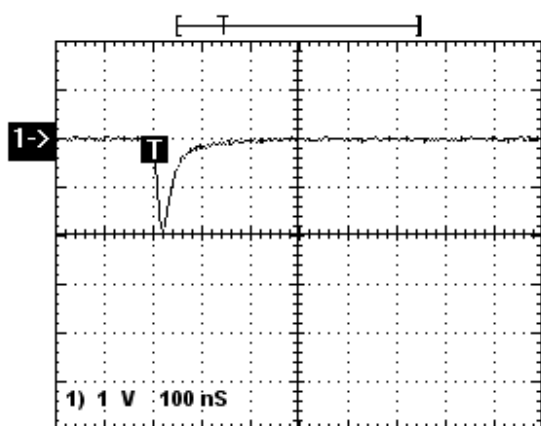


Рис. 3. Осциллограмма изменения сопротивления резисторов с сопротивлением 1 кОм, мощностью 0,5 Вт в процессе радиационного воздействия

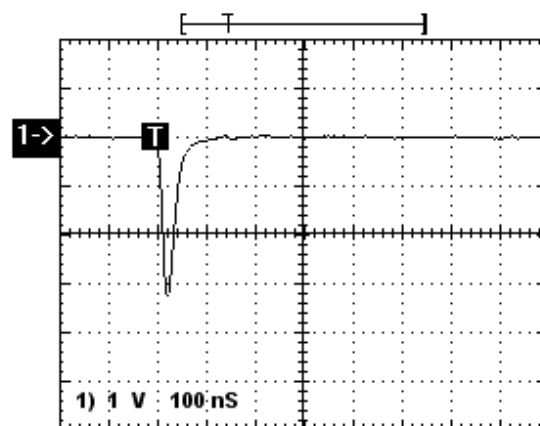


Рис. 4. Осциллограмма изменения сопротивления наборов резисторов 10 кОм, мощностью 0,2 Вт в процессе радиационного воздействия

### Заключение

Полученные в результате исследования данные свидетельствуют о том, что ИИ вызывает в испытуемых изделиях обратимое появление проводимости в диэлектрических материалах керамического основания, защитных покрытиях и окружающем воздухе. Установлено, что вызванное воздействием ИИ появление проводимости приводит к резкому обратимому уменьшению сопротивления резисторов во время и непосредственно после облучения.

Степень снижения сопротивления пропорциональна интенсивности воздействующих факторов и зависит от характеристик диэлектрических материалов, номинала резисторов и характеристик окружающей среды. Полученные в ходе исследования результаты свидетельствуют о том, что время потери работоспособности в процессе радиационного воздействия в большей степени зависит от длительности импульса ИИ. На основе полученных осциллограмм изменения сопротивления изделий в процессе радиационного воздействия определено, что для испытуемых образцов время потери работоспособности составит от 100 до 200 нс.

Получены экспериментальные данные о том, что в условиях окружающей воздушной среды реакция резисторов на ИИ практически полностью определяется взаимодействием проводящих элементов их конструкции с окружающим ионизированным воздухом.

Время восстановления сопротивления резисторов после окончания радиационного воздействия определяется запаздывающими составляющими радиационной проводимости диэлектрических материалов конструкции резисторов и воздуха, так как мгновенная составляющая наведенной проводимости практически повторяет форму импульса ИИ.

### Библиографический список

1. Горячева, Г. А. Действие проникающей радиации на радиодетали / Г. А. Горячева, А. А. Шапкин, Л. Г. Ширшев. – Москва : Атомиздат, 1971. – 122 с.

2. Хала, И. Радиоактивность, ионизирующее излучение и ядерная энергетика / И. Хала, Дж. Д. Навратил. – Москва : ЛКИ, 2013. – 432 с.
3. Ишков, А. С. Автоматизированная система для повышения надежности и эффективности испытаний на импульсную термоэлектротренировку изделий электронной техники / А. С. Ишков, Г. А. Солодимова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2017. – № 2. – С. 43–46.
4. ГОСТ 16504-81. СГИП. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
5. Годовицын, В. А. Влияние мощных импульсных помех на работу автоматизированных систем физического эксперимента / В. А. Годовицын // Автоматизация физических исследований. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – С. 189–193.
6. РД В 319.03.31-99. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Рациональный состав и последовательность испытаний на соответствие заданным требованиям по радиационной стойкости.
7. РДВ 319.03.31-99. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Рациональный состав и последовательность испытаний на соответствие заданным требованиям.
8. ГОСТ 2134220-78. Резисторы. Метод измерения сопротивления.

### References

1. Goryacheva G. A., Shapkin A. A., Shirshov L. G. *Deystvie pronikayushchey radiatsii na radiodetali* [Effect of penetrating radiation on radio components]. Moscow: Atomizdat, 1971, 122 p. [In Russian]
2. Khala I., Navratil Dzh. D. *Radioaktivnost', ioniziruyushchee izluchenie i yadernaya energetika* [Radioactivity, ionizing radiation and nuclear power]. Moscow: LKI, 2013, 432 p. [In Russian]
3. Ishkov A. S., Solodimova G. A. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics]. 2017, no. 2, pp. 43–46. [In Russian]
4. GOST 16504-81. SGIP. *Ispytaniya i kontrol' kachestva produktsii. Osnovnye terminy i opredeleniya* [GOST 16504-81. SGIP. Product testing and quality control. Basic terms and definitions]. [In Russian]
5. Godovitsyn V. A. *Avtomatizatsiya fizicheskikh issledovaniy* [Automation of physical research]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, pp. 189–193. [In Russian]
6. RD V 319.03.31-99. *Izdeliya elektronnoy tekhniki, kvantovoy elektroniki i elektrotekhnicheskie voennogo naznacheniya. Ratsional'nyy sostav i posledovatel'nost' ispytaniy na sootvetstvie zadannym trebovaniyam po radiatsionnoy stoykosti* [RD AT 319.03.31-99. Electronic equipment, quantum electronics, and military electrical products. Rational composition and sequence of tests for compliance with the specified requirements for radiation resistance]. [In Russian]
7. RDV 319.03.31-99. *Izdeliya elektronnoy tekhniki, kvantovoy elektroniki i elektrotekhnicheskie. Ratsional'nyy sostav i posledovatel'nost' ispytaniy na sootvetstvie zadannym trebovaniyam* [RDV 319.03.31-99. Electronic equipment, quantum electronics, and electrical products. Rational composition and sequence of tests for compliance with the specified requirements]. [In Russian]
8. GOST 2134220-78. *Rezistory. Metod izmereniya soprotivleniya* [GOST 2134220-78. Resistors. Resistance measurement method]. [In Russian]

#### **Ишков Антон Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: ishkovanton@mail.ru

#### **Ishkov Anton Sergeevich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio engineering  
and electronic systems,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### **Петров Александр Сергеевич**

кандидат технических наук,  
начальник отдела управления  
радиационных испытаний,  
Научно-исследовательский институт приборов  
(Россия, Московская обл., г. Лыткарино,  
промзона Тураево, строение 8)  
E-mail: as\_petrov@inbox.ru

#### **Petrov Aleksandr Sergeevich**

candidate of technical sciences,  
head of department of radiation tests,  
Scientific Research Institute of Devices  
(building 8, industrial zone Turayevoye, Lytkarino,  
Moscow region, Russia)

***Солодимова Галина Анатольевна***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра информационно-измерительной техники  
и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: solodimova@mail.ru

***Solodimova Galina Anatol'evna***

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of information-measuring  
technique and metrology,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Егоров Денис Владимирович***

начальник отдела надежности и испытаний,  
Научно-исследовательский институт  
электронно-механических приборов  
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)  
E-mail: edv.egorov@ya.ru

***Egorov Denis Vladimirovich***

head of department of reliability and testing,  
Scientific Research Institute  
of Electro-mechanical Devices  
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

**Образец цитирования:**

Ишков, А. С. Исследование надежности резисторов в условиях воздействия ионизирующего излучения / А. С. Ишков, А. С. Петров, Г. А. Солодимова, Д. В. Егоров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 35–42. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-5.