

А. Ю. Доросинский, Е. А. Данилова, О. Н. Герасимов, А. В. Лысенко, Е. А. Кузина

СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА¹

A. Yu. Dorosinskiy, E. A. Danilova, O. N. Gerasimov, A. V. Lysenko, E. A. Kuzina

WAYS OF IMPROVING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF RESISTIVE ELEMENTS AND METHODS OF THEIR CALCULATION

Аннотация. *Актуальность и цели.* Представлена актуальная задача повышения тактико-технических характеристик проволочных резистивных элементов, решение которой позволяет повысить качество радиоэлектронной аппаратуры. Проводится анализ технологий проволочных резистивных элементов, сохраняющих свою работоспособность после воздействия на них повышенных механических нагрузок. *Материалы и методы.* Определены пути повышения работоспособности в условиях механических нагрузок. Дается обоснование выбора конструкции резистивных элементов, расчеты точечных данных, а также электрических и механических характеристик. Обоснован выбор резистивной проволоки, технологических факторов, обеспечивающих качество изделия. *Результаты.* Разработана конструкция и технология производства проволочных резистивных элементов, предназначенных для регулировки напряжения в специальных изделиях и способных сохранять свою работоспособность после воздействия на них сильных вибраций и ударов. Представлены результаты испытаний, определяющие наиболее опасное направление приложения механической нагрузки. *Выводы.* Результаты экспериментальных работ и проведенных натурных испытаний подтвердили соответствие разработанной конструкции техническим требованиям.

Ключевые слова: ударная нагрузка, конструкционный материал, резистор, контактное давление.

Abstract. The authors consider theoretical issues of the impact of shocks on structural materials and wire wound resistors. The theoretical description of the shock processes and the mechanisms of their influence on the structural elements of electronic equipment and electronic products. We investigated the mechanisms of failure of the wire resistors and determined their efficiency in the process of exposure to elevated shock loads. Developed recommendations to improve the resistance of the wire resistors to these impacts.

Key words: shock loading, construction material, resistor, contact pressure.

Проволочные резистивные элементы и резисторы находят широкое применение в качестве составных элементов в радиоэлектронной технике и системах автоматизированного управления в качестве измерительных датчиков. Поэтому повышение тактико-технических характеристик данных изделий является актуальной задачей, решение которой позволяет повысить качество радиоэлектронной аппаратуры.

Для изделий, работающих в условиях сильных вибраций и ударов, на первое место выступают задачи улучшения их работоспособности в условиях повышенных механических нагрузок.

Улучшение работоспособности в данном случае может быть достигнуто за счет [1]:

¹ Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Адаптивная интеллектуальная система вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и авиационной техники нового поколения на основе многофункциональной цифровой генерации испытательных сигналов» (Соглашение № 17-79-10281 от 24.07.2017) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

- совершенствования конструкции резистивного элемента;
- выбора соответствующего каркасного материала и электроизоляционных покрытий;
- выбора материала резистивной проволоки;
- выбора типа выводов и способа их крепления на резистивном элементе.

По своей конструкции кольцевые проволочные резистивные элементы могут быть двух типов: на каркасе круглого (тороидального) и каркасе прямоугольного сечения. Каждый из этих типов имеет свои достоинства и недостатки, в соответствии с которыми и выбирают конструкцию резистивного элемента, отвечающую конкретным задачам и условиям эксплуатации.

В качестве каркаса для первого типа резистивных элементов применяется чаще всего медный провод круглого сечения в высокопрочной эмалевой изоляции, изогнутый в кольцо после намотки резистивной проволоки. Данному типу конструкции присуще: высокая технологичность изготовления резистивного элемента, что очень важно в условиях серийного производства, возможность применения самого современного намоточного оборудования [2, 3].

Применение проволочных каркасов дает возможность производить равномерное натяжение резистивной проволоки и точную раскладку ее витков на каркасе, получать резистивные элементы высокого качества с высокими механическими и электрическими характеристиками.

Для конструкции резистивных элементов второго типа каркасы выполняются, как правило, из алюминиевых сплавов либо точением колец, либо применением лент соответствующих габаритов с последующим электроизоляционным покрытием и изгибанием в кольцо. Особенно ответственной операцией при этом является нанесение равномерного, высокопрочного электроизоляционного покрытия.

Конструкция резистивного элемента на каркасе прямоугольного сечения позволяет получать большие значения номинального сопротивления. Однако данный тип конструкции обладает рядом существенных недостатков, ограничивающих их широкое применение [4]:

- сложность и большая трудоемкость их изготовления;
- необходимость нанесения надежного электроизоляционного покрытия на поверхность каркаса;
- неравномерности натяжения и раскладки витков намотки, резко ухудшающие эксплуатационные возможности резистивных элементов и др.

Исходя из вышеизложенного наиболее предпочтительным вариантом конструкции резистивных элементов для данной разработки является конструкция на каркасе круглого (тороидального) сечения.

Основными требованиями при выборе резистивной проволоки являются: достаточно высокое ее удельное сопротивление, незначительный коэффициент температурного сопротивления в интервале заданных температур, малая электродвижущая сила по отношению к меди, стабильное во времени контактное сопротивление в паре с применяемым скользящим контактом, высокая износостойкость, коррозионная стойкость и механическая прочность.

Резистивная проволока должна выдерживать без разрушения те напряжения, которые возникают в витках намотки от деформаций изгиба и растяжения при изготовлении резистивного элемента и дополнительных деформаций от воздействия на него в процессе эксплуатации ударных и линейных нагрузок.

Механические напряжения, возникающие в материале проволоки, являются следствием того натяжения, с которым проволока наматывается на каркас, и натяжения от механических нагрузок при эксплуатации. При этом от силы натяжения, с одной стороны, зависит качество изготовления резистивного элемента и его электрические характеристики (придание обмотки определенной формы, получение необходимой плотности сцепления с каркасом и т.д.), с другой – чрезмерное ослабление или натяжение может привести как в нормальных, так и эксплуатационных условиях к обрывам витков под воздействием механических нагрузок.

Большое влияние на работоспособность резистивного элемента в условиях воздействия повышенных механических нагрузок оказывает прочность контактного соединения вывода с резистивной проволокой. Контактное соединение должно удовлетворять следующим требованиям: иметь максимальную прочность и электропроводность, а также минимальное значение переходного сопротивления при длительном механическом, электрическом и климатическом воздействии. Прочность соединения должна быть не ниже, чем у наименее прочной из соединяемых деталей (резистивной проволоки).

Проверку на прочность целесообразно производить в той части витка намотки, которая не закреплена клеем, считая, что длина ее составляет 180° и равна

$$\frac{l_{\text{в}}}{2} = 3,14(d_{\text{к}} + d).$$

Вес половины витка проволоки в нормальных условиях будет равен

$$p = \gamma v,$$

где γ – удельный вес проволоки; v – объем проволоки.

Действующее на проволоку усилие при некотором ускорении будет равно

$$F_{\text{пр}} = PgK,$$

где K – коэффициент нагрузки.

Составляем эквивалентную расчетную схему, для которой известны аналитические зависимости. При этом берем самый опасный момент, когда внешние нагрузки действуют на отрыв незакрепленной части витка от каркаса.

Расчетная схема в этом случае имеет вид, изображенный на рис. 1.

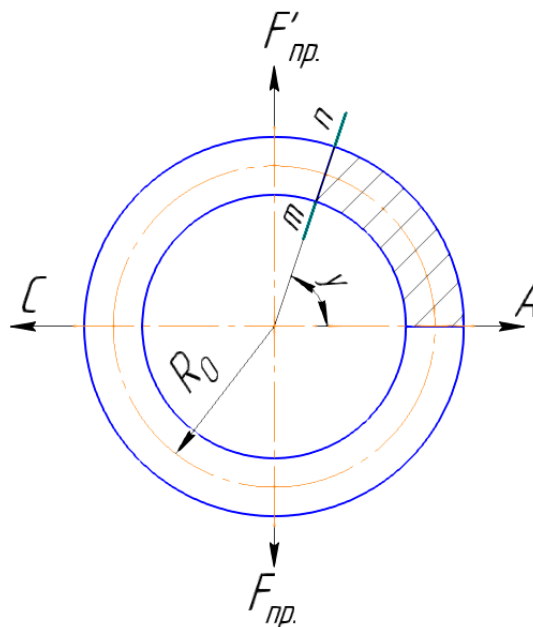


Рис. 1. Расчетная схема витка намотки

Каждый виток проволоки испытывает действие двух противоположно направленных сил $F_{\text{пр}}$ и реакции $F'_{\text{пр}} = F_{\text{пр}}$.

Необходимо отметить, что для упрощения расчетов равномерно распределенная по длине витка нагрузка заменена сосредоточенной силой, приложенной в центре витка. Найдем опасное сечение при действии этой нагрузки [5].

Если рассечь виток по какому-нибудь сечению mn , наклоненному к горизонту под углом α , то о величине напряжения в этом сечении из условий статики узнать невозможно, т.е. задача внутренне статистически неопределима, хотя внешние силы, действующие на виток, известны. Для определения напряжений нужно отсечь часть витка и рассмотреть ее равновесие. Допустим, что известны напряжения в каком-либо сечении A , которые в общем случае складываются в пару сил M_a , нормальную силу N_a и касательную Q_a . Выделим часть витка между сечениями mn и A и уравновесим действующие на нее по сечению A силы M_a , N_a и Q_a системой M , N и Q для сечения mn [6].

Считая силы M_a , N_a и Q_a положительными, получим

$$M = M_a + N_a R_0 (1 - \cos y) + Q_a R_0 \sin y; \quad (1)$$

$$N = N_a \cos y - Q_a \sin y; \quad (2)$$

$$Q = Q_a \cos y - N_a \sin y.$$

Из уравнений видно, что необходимо найти три статически неопределимые величины внутренних усилий в каком-либо сечении A витка, тогда через них можно определить эти же усилия в любом сечении.

Разрежем виток сечениями в точках A и C на две половины (рис. 2).

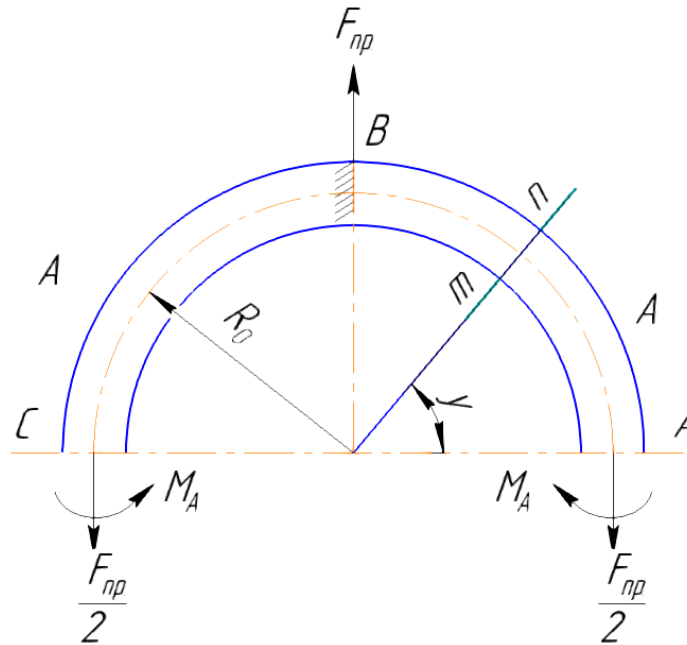


Рис. 2. Геометрия витка катушки

По симметрии нормальные усилия в точках A и C равны $\frac{F_{np}}{2}$, а касательные равны нулю. Из трех «лишних» неизвестных остается только усилие M_a . Кроме того, по симметрии сечения B и A полувитка не поворачивается при деформации, поэтому четверть витка AB можно рассматривать кривой стержень, заземленный в сечении B и нагруженный на конце силой $\frac{F_{np}}{2}$ и моментом M_a .

Отсюда неизвестное усилие M_a определится из условия, что поворот сечения A равен нулю, т.е. по формуле Мора имеем

$$\int_0^{\frac{s}{4}} \frac{MM^0}{Ey} dS = 0, \quad (3)$$

где M^0 – единичный момент, приложенный в сечении A по направлению действующего неизвестного момента M_a ; M – изгибающий момент; S – длина дуги витка; E – модуль упругости материала; y – момент инерции сечения витка.

Изгибающий момент из уравнения (1) равен

$$M = M_a + \frac{F_{np}}{2} (1 - \cos y) R_0; \quad M^0 = 1.$$

Отрезок дуги $d_3 = R_0 dy$.

Подставляя значения в уравнение (3), получим

$$\frac{1}{Ey} \int_0^{\frac{\pi}{4}} MM^0 \cdot dS = \frac{1}{Ey} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[M_a + \frac{F_{np}}{2} (1 - \cos y) R_0 \right] R_0 dy = 0.$$

Отсюда

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} M_a R_0 dy + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{F_{np}}{2} (1 - \cos y) R_0^2 dy = 0$$

или

$$M_a R_0 \frac{\pi}{2} + \frac{F_{np}}{2} R_0^2 \frac{\pi}{2} - \frac{F_{np}}{2} R_0^2 = 0.$$

Находим момент M_a

$$M_a = -\frac{1}{2} F_{np} R_0 \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) = -0,182 F_{np} R_0.$$

Таким образом, изгибающий момент получился отрицательным

$$M_a = -0,182 F_{np} R_0.$$

Найдем изгибающий момент в сечении B , где приложена сила F_{np} , при этом $y = \frac{\pi}{2}$:

$$M_b = M_a + \frac{F_{np}}{2} R_0 (1 - \cos y) = -0,182 F_{np} R_0 + 0,5 F_{np} R_0 = 0,318 F_{np} R_0.$$

Нормальное усилие в этом сечении по уравнению (2) равно

$$N = N_a \cos y - Q_a \sin y = \frac{F_{np}}{2} \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

Таким образом, для витка самым опасным будет сечение B , хотя нормальная сила в этом сечении равна нулю. Основные напряжения, возникающие под действием усилий в данном сечении, будут касательными. Принимает по энергетической теории допустимые касательные напряжения равными $0,6[\sigma_v]$.

Чтобы виток не порвался при действии механических нагрузок, должно соблюдаться условие: $\tau < [\tau]$.

Таким образом, для витка самым опасным будет сечение B , хотя нормальная сила в этом сечении равна нулю. Основные напряжения, возникающие под действием усилий в данном сечении, будут касательными.

Условия работы резистивной проволоки несколько ухудшаются в месте пайки, так как здесь усилие F , действующее на виток, увеличивается ввиду увеличения веса витка из-за пайки.

Считаем, что проволока углубляется в пайку на половину диаметра. В этом случае объем, забираемый пайкой, будет равен

$$v = v_1 + v_2 = \frac{\pi a^2 l_1}{2} + 0,15 \cdot 1,5 l_1 + \frac{\pi a^2 h}{2} + \frac{2}{3} \pi a^2.$$

Вес пайки равен

$$P_n = \gamma v.$$

При воздействии повышенных ускорений на каждый виток, расположенный под пайкой, будет действовать дополнительное усилие.

Суммарное усилие, действующее на виток, складывается из усилия, создаваемого весом пайки, и усилия от веса проволоки

$$F = F_{\text{пр}} + F_{\text{п}}.$$

Расчетная схема имеет такой же вид, как и на рис. 2.

При намотке возможно недопустимое врезание проволоки в изоляцию каркаса, так как намотка производится с определенным усилием натяжения. Натяжение проволоки – один из основных технологических факторов, определяющих точность сопротивления резистивного элемента, а также точность намотки по шагу. Выбор оптимального усилия натяжения для каждого диаметра и марки резистивной проволоки и постоянство этого усилия во времени имеют немаловажное значение. В нашем случае при каркасе круглого сечения постоянство натяжения проволоки при намотке обеспечивается с небольшими погрешностями.

Уже в нормальных условиях резистивная проволока создает давление на каркас. Так как натяжение проволоки постоянно, то это давление в любой точке поверхности каркаса тоже постоянно и равно по величине двум усилиям натяжения

$$P = 2F_{\text{нат}}.$$

Данные экспериментальной проверки показали, что увеличение нагрузки на каркас при воздействии повышенных ускорений не вызовет опасного прорезания изоляции провода.

Оценим возможность повышения качества контактного узла. Критерием, позволяющим дать достоверную оценку паяному соединению, является его механическая прочность при воздействии повышенных механических нагрузок при эксплуатации.

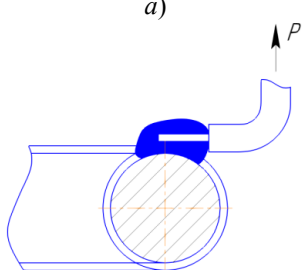
Проведенные расчеты показали, что конструктивных запасов прочности вполне достаточно, чтобы контактный узел и резистивный элемент выдерживали без разрушения воздействие указанных величин механических нагрузок.

Однако оценка прочности контактного узла в конечном итоге производится по величине его разрыва. Исходя из этого, основной задачей данного эксперимента является определение той минимальной величины усилия, при которой контактный узел разрушается.

Испытания проводились на образцах резистивных элементов, намотанных резистивной проволокой Н80ХЮД. В качестве гибких выводов применен провод МГТФ с сечением 0,07 и 0,14 мм². Пайка выводов к резистивной проволоке производилась припоем ПСр-2,5. Габариты пайки у всех испытываемых образцов выбирались примерно одинаковые, 1,5–1,6 мм по диаметру. Количество витков в пайке при этом составляло 37–40.

Направление приложения нагрузки (схема испытаний) и результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Схема испытаний	Проволока Н80ХЮД Ø0,02 мм Вывод-провод МГТФ 0,07 мм ²		Проволока Н80ХЮД Ø0,3 мм Вывод-провод МГТФ 0,07 мм ²		Проволока Н80ХЮД Ø0,3 мм Вывод-провод МГТФ 0,14 мм ²	
	Усилие разрыва, г	Характер разрыва	Усилие разрыва, г	Характер разрыва	Усилие разрыва, г	Характер разрыва
1	2	3	4	5	6	7
a) 	570–590	обрыв вывода обрыв пайки	560–590	отрыв пайки	300–400	отрыв пайки

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
 <p>б)</p>	1300–1400	обрыв вывода	1300–1500	отрыв пайки	800–1300	отрыв пайки
 <p>в)</p>	900–1300	обрыв вывода обрыв пайки	1200–1450	отрыв пайки	750–900	отрыв пайки

Из таблицы видно, что наиболее опасное направление приложения нагрузки соответствуют схеме а, где минимальное усилие разрыва вывода или отрыва пайки от намотки у образцов с резистивной проволокой 0,02 мм и сечением 0,07 мм² составляет 560–590 г. Но и эти показатели с большим запасом перекрывают величины, полученные при предварительных расчетах.

Резкое снижение прочности пайки у образцов с диаметром проволоки 0,3 мм и выводами сечением 0,14 мм² объясняется уменьшением (при тех же габаритах пайки) массы припоя, приходящейся на вывод и контактную площадку резистивной проволоки. Увеличение прочности до 560–590 г потребует увеличения габаритов пайки до 1,6–1,8 мм по диаметру.

В целях определения прочности изоляции каркасного провода были проведены экспериментальные работы. Для этого на каркас диаметром 2,44 мм (по меди) производилась намотка резистивной проволоки Н80ХЮД различного диаметра с различными усилиями натяжения.

Результаты эксперимента сведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер образцов	Диаметр резистивной проволоки, мм	Шаг намотки, мм	Натяжение, г	Погружение, %	Пробивное напряжение, В
98÷100	0,02	0,04	8	14÷15	800÷1400
101÷103	0,02	0,04	10	17	1400÷1800
104÷106	0,03	0,06	20	10÷15	800÷2600
107÷109	0,03	0,06	30	13÷19	600÷1400
110÷112	0,06	0,12	40	3÷4	650÷2600
113÷115	0,06	0,12	50	6÷10	1800
116÷118	0,06	0,12	60	6÷10	600÷1400
119÷121	0,06	0,12	70	7÷9	1200÷2400
122÷124	0,06	0,12	80	7÷10	600÷1200
125÷127	0,06	0,12	90	7÷11	700÷1000

По результатам проведенной работы видно, что при любом диаметре резистивной проволоки и различном усилии натяжения погружение последней в эмаль каркаса незначительно; это дает основание заключить: увеличение нагрузки на каркас при воздействии повышенных ускорений не вызовет опасного прорезания изоляции каркасного провода.

Такой же вывод можно сделать и из результатов проверки резистивных элементов на пробивное напряжение. Минимальное пробивное напряжение, полученное при проверке, как видно из табл. 2, равно 600 В, что более чем в 20 раз превышает предельное рабочее напряжение. Следовательно, изоляция каркасного провода удовлетворяет техническим требованиям, как по механическим, так и по электрическим параметрам.

Библиографический список

1. Автоматизированное рабочее место контроля параметров переменных резисторов / А. С. Емельянов, А. Ю. Доросинский, И. И. Кочегаров, Р. Г. Нанеташвили, Н. К. Юрков // Современные информационные технологии. – 2016. – № 24. – С. 60–64.
2. Герасимов, О. Н. К вопросу защиты электронных средств летательных аппаратов от внешних механических воздействий / О. Н. Герасимов, Н. А. Бекниязов, Н. К. Юрков // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского : материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. – М : Изд. дом Академии имени Н. Е. Жуковского, 2015. – С. 386–390.
3. Герасимов, О. Н. Влияние ударных нагрузок на конструкционные материалы и проволочные резисторы / А. Ю. Доросинский, О. Н. Герасимов, Д. В. Артамонов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 33–36. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-3-5.
4. Герасимов, О. Н. Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники / О. Н. Герасимов, А. Ю. Доросинский, М. Н. Березин // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 37–42. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-3-6.
5. Белевцев, А. Т. Потенциометры / А. Т. Белевцев. – М. : Машиностроение, 1969. – 168 с.
6. Феодосьев, В. И. Сопrotивление материалов : учебник для студентов высш. техн. учеб. зав. / В. И. Феодосьев. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 588 с.

Доросинский Антон Юрьевич

кандидат технических наук, ведущий инженер,
специальное конструкторское бюро,
ОАО «Электромеханика»
(440052, Россия, г. Пенза, ул. Гоголя 51/53),
E-mail: antik_r13@mail.ru

Данилова Евгения Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования и производства
радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: siori@list.ru

Герасимов Олег Николаевич

начальник военного представительства,
Министерство обороны РФ
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: gera0502@mail.ru

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования и производства
радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Кузина Екатерина Андреевна

студент,
Московский технологический университет
МИРЭА
(119454, Россия, г. Москва,
проспект Вернадского, 78)
E-mail: ketrinkuz97@mail.ru

Dorosinskiy Anton Yur'evich

candidate of technical sciences, lead engineer,
special design bureau,
Electromechanica factory
(440052, 51/53 Gogolya street, Penza, Russia)

Danilova Evgeniya Anatol'evna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Gerasimov Oleg Nikolayevich

head of the military mission
The Ministry of defense RF
(440026, 8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Lysenko Aleksey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kuzina Ekaterina Andreevna

student,
Moscow Technologic UNIVERSITY «MIREA»
(119454, 78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

УДК 658.5

Способы улучшения механических характеристик резистивных элементов и методы их расчета / А. Ю. Доросинский, Е. А. Данилова, О. Н. Герасимов, А. В. Лысенко, Е. А. Кузина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 84–92. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-11.