

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ РЕЗИСТОРОВ В АППАРАТНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А. Ю. Доросинский¹, О. В. Прокофьев², И. Ю. Семочкина³

¹ Научно-производственное предприятие «Сонар», Пенза, Россия
^{2,3} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
¹ antik_r13@mail.ru, ² prokof_ow@mail.ru, ³ ius1961@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Непроволочные резисторы являются одним из самых массовых видов радиодеталей. Их количество в современной радиоаппаратуре достигает более одной трети (40 %) от общего количества всех резисторов. Следовательно, надежность работы современных радиоэлектронных устройств в значительной степени зависит от качества этих резисторов. Отсюда основными требованиями при их разработке остается повышение тактико-технических и эксплуатационных характеристик. Кроме того, при разработке непроволочных резисторов необходимо учитывать, что в современных условиях радиоэлектронная аппаратура может подвергаться воздействию радиоактивных излучений, а также работать на больших высотах и в условиях космических скоростей. Поэтому в настоящее время работы в области повышения устойчивости резисторов к механическим и климатическим воздействиям являются востребованными. *Материалы и методы.* Перспективным направлением в области совершенствования переменных резисторов для достижения лучших тактико-технических и эксплуатационных параметров является использование металлокерамических пленок в качестве резистивного элемента, так как появляется возможность создавать весьма миниатюрные подстроечные потенциометры с бесконечной разрешающей способностью. *Результаты.* Сформулированы технические ограничения проволочной технологии изготовления резистивных элементов. Представлены и теоретически обоснованы эксплуатационные преимущества металлокерамических резистивных элементов перед проволочными. Выполнен сравнительный анализ непроволочных переменных резисторов на основе металlopленочных элементов, металлокерамики и проводящих пластмасс. Указаны особенности технологии изготовления потенциометров с керметным резистивным элементом. Даны рекомендации по дальнейшему направлению работ в области создания металлокерамических переменных резисторов. *Выводы.* Возможность создания прецизионных потенциометров с принципиально новыми требованиями по точности, надежности и качеству определяется совершенствованием способов управления процессом нанесения металлокерамических паст и повышением точности поддержания температуры обжига в печах. Продолжение исследований электрофизических свойств металлокерамики позволит найти новые подходы к улучшению воспроизводимости параметров.

Ключевые слова: резистивный материал, металлокерамика, проводящая пластмасса, переменный резистор, резистивный элемент, технология

Для цитирования: Доросинский А. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Перспективы применения композиционных резисторов в аппаратном обеспечении информационно-измерительных систем // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 98–105. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-11

PROSPECTS FOR THE USE OF COMPOSITE RESISTORS IN THE HARDWARE OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

A.Yu. Dorosinskiy¹, O.V. Prokof'ev², I.Yu. Semochkina³

¹ Research and Production Enterprise "Sonar", Penza, Russia
^{2,3} Penza State Technological University, Penza, Russia
¹ antik_r13@mail.ru, ² prokof_ow@mail.ru, ³ ius1961@gmail.com

Abstract. *Background.* Non-wire resistors are one of the most popular types of radio components. Their number in modern radio equipment reaches more than one third (40 %) of the total number of all resistors. Consequently, the reliability of modern electronic devices largely depends on the quality of these resistors. Hence, the main requirements for their development remain the improvement of tactical, technical and operational characteristics. In addition, when developing non-wire resistors, it is necessary to take into account that in modern conditions radio-electronic

equipment can be exposed to radioactive radiation, as well as work at high altitudes and in conditions of cosmic velocities. Therefore, at present, work in the field of increasing the resistance of resistors to mechanical and climatic influences is in demand. *Materials and methods.* A promising direction in the field of improving variable resistors to achieve the best tactical, technical and operational parameters is the use of metal-ceramic films as a resistive element, since it becomes possible to create very miniature tuning potentiometers with infinite resolution. *Results.* The technical limitations of the wire manufacturing technology of resistive elements are formulated. The operational advantages of metal-ceramic resistive elements over wire ones are presented and theoretically substantiated. A comparative analysis of non-wire variable resistors based on metal-film elements, cermetes and conductive plastics has been performed. The features of the manufacturing technology of potentiometers with a kermet resistive element are indicated. Recommendations are given on the further direction of work in the field of creating metal-ceramic variable resistors. *Conclusions.* The possibility of creating precision potentiometers with fundamentally new requirements for accuracy, reliability and quality is determined by the improvement of methods for controlling the process of applying ceramic-metal pastes and increasing the accuracy of maintaining the firing temperature in furnaces. The continuation of studies of the electrophysical properties of cermetes will allow us to find new approaches to improving the reproducibility of parameters.

Keywords: resistive material, cermet, conductive plastic, variable resistor, resistive element, technology

For citation: Dorosinskiy A.Yu., Prokofev O.V., Semochkina I.Yu. Prospects for the use of composite resistors in the hardware of information and measurement systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):98–105. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-11

Введение

Непроволочные резисторы как элементы преобразователей информационно-измерительных систем и радиоэлектронной аппаратуры являются одними из самых массовых видов радиодеталей в силу хороших тактико-технических параметров и низкой стоимости.

Основными направлениями в совершенствовании данных изделий остаются: расширение температурных пределов; повышение допустимой удельной мощности рассеяния, дающей возможность уменьшить размеры и вес изделий; увеличение точности изготовления резисторов относительно номинального значения сопротивления; повышение надежности. Значительное место отводится работам по снижению тепловых шумов. У переменных резисторов дополнительно стремятся снизить шумы, возникающие при перемещении подвижного контакта и повысить точность воспроизведения функциональной характеристики.

Актуальным остается и повышение устойчивости резисторов к механическим и климатическим воздействиям [1, 2].

Отдельное внимание уделяется созданию особо малогабаритных резисторов, получивших название миниатюрных и микроминиатюрных, предназначенных для работы в малогабаритных схемах для нужд роботостроения, военной и космической техники.

За последнее время изучению металлокерамических материалов уделяется много внимания. В результате достигнуты большие успехи в области выбора материалов, их оптимальных конструкций и специальных методов производства. По литературным данным металлокерамика перспективна не только при изготовлении жаропрочных, абразивных и механически прочных деталей в электропромышленности, но и как проводящий материал для непроволочных резисторов [3].

В настоящее время практически все подстроечные резисторы, выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью, имеют металлокерамические резистивные элементы в силу их низкой стоимости, хороших эксплуатационных параметров и низких требований к точности воспроизведения функциональной характеристики.

Технические ограничения проволочной технологии изготовления резистивных элементов

При необходимости получения высоких точностных характеристик как правило используют проволочную технологию получения резистивных элементов, поскольку резистивные элементы, изготовленные намоткой проволоки или ленты на непроводящий сердечник, характеризуются хорошей стабильностью и высокой точностью воспроизведения функциональной характеристики. Подобные требования предъявляются к такому классу изделий, как потенциометры.

Тем не менее потенциометры с проволочным резистивным элементом имеют узкий диапазон сопротивления, ограниченный низким омическим сопротивлением резистивных материалов, пригодных для применения в этих изделиях, и минимальными размерами проволоки или ленты [4]. С увеличением числа витков возрастает разрешающая способность, но в некоторых случаях ее не

хватает для получения желаемого значения установленного сопротивления. С этой точки зрения непроволочные резистивные элементы имеют потенциальное преимущество, так как обладают бесконечной разрешающей способностью.

Номинальные значения сопротивлений проволочных потенциометров лежат в пределах от 1000 до 50000 Ом, поскольку при меньших значениях они обладают большими шумами, повышенным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и ухудшенным разрешением в сравнении с непроволочными чувствительными элементами. Кроме того, непроволочные резисторы в цепях переменного тока работают лучше, чем проволочные, так как они обладают меньшей индуктивностью и емкостью между обмоткой и корпусом.

Более того, благодаря применению непроволочных резистивных элементов можно избежать множества проблем, имеющих место при применении проволочных резистивных элементов, таких как ослабление витка, застревание частиц металла между витками, обрыв проволоки, приводящий к катастрофическому отказу, возникновение кратковременной дуги, испаряющей металл, при коротком замыкании и пр.

При этом использование непроволочных резистивных элементов в прецизионных потенциометрах осложняется невозможностью получения требуемых характеристик, позволяющих обеспечить высокую точность, а также невозможностью применения методик коррекции функциональной характеристики, таких как электрическое и механическое профилирование [4].

Тем не менее данная тема представляет практический интерес, так как внедрение технологий, позволяющих получать непроволочные резистивные элементы с требуемыми параметрами функциональной характеристики, позволило бы существенно повысить технические возможности и эксплуатационные свойства потенциометров.

Материалы, используемые при создании непроволочных резистивных элементов

Для непроволочных резистивных элементов в настоящее время используются три вида материалов: металлические пленки, токопроводящие пластмассы и металлокерамика [1, 3].

Резисторы, изготовленные нанесением тонких металлических пленок на основания из непроводящих материалов пульверизацией или испарением в вакууме, используют металлы и сплавы с относительно низкими омическими сопротивлениями, такие как палладий, никель, хром и др. Такие резисторы с большой величиной номинального сопротивления иногда имеют толщину проводящей пленки в несколько десятков мономолекулярных слоев материала. Металлопленочные резисторы в случае тонких пленок подвергаются большим изменениям от воздействия электрических токов и флуктуаций температуры и, кроме того, критичны к воздействиям механического нажима и истирания.

Пластмассовый резистивный элемент обеспечивает высокие номиналы сопротивлений и дает наибольшее полное число поворотов ротора, до возникновения внезапного отказа, что объясняется ровной поверхностью дорожки и большим объемом резистивного материала (рис. 1) [1].

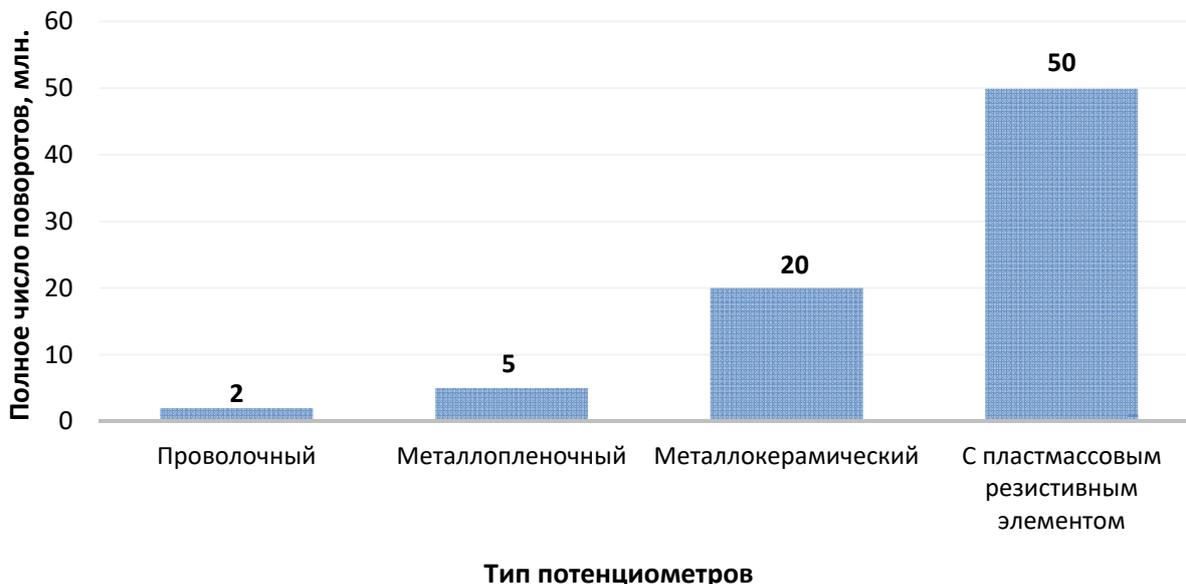


Рис. 1. Средний ресурс перемещения подвижного контакта

Поверхность металлокерамических потенциометров также позволяет получить хорошую износоустойчивость за счет применения более мягкого контакта. Вследствие этого металлокерамические резистивные элементы успешно выдерживают до 20 млн оборотов без нагрузки (рис. 1). Прочная поверхность металлокерамического элемента обеспечивает также максимальный срок службы при сильной вибрации. При этом из-за образования искрения у выводов элементов при нагруженном подвижном контакте срок службы снижается, но и в этом случае он выше, чем у проволочных [3, 4].

По сути, металлокерамические резистивные элементы представляют собой керметную пленку, толщиной от 0,0125 до 0,125 мм, что значительно толще металлопленочных, воженную в керамическую подложку. Металлокерамические резистивные элементы имеют настолько сильную адгезию с подложкой, что исключается их отслаивание. В качестве проводящего материала могут использоваться: чистые металлы (Rh, Pt, Al, Zn, W), силициды металлов (MoSi_2), окислы металлов (ZnO , CdO , Jn_2O_3 , WO_3) и карбиды (WC и др.).

Основные электрические характеристики потенциометров на основе металлокерамики в сравнении со свойствами других типов потенциометров представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики	Однооборотные проволочные	Многооборотные проволочные	Проводящие пластмассы	Металлопленочные	Металлокерамические
Наилучшее разрешение, %	0,08	0,01	0	0	0
Наилучшая линейность, %	на выводах	0,01	0,10	1,00	-
	средняя	0,10	0,05	0,50	1,0
Применение в цепях переменного тока	Среднее	Плохое	Хорошее	Хорошее	Хорошее
Число оборотов	1	2–40	1	1	1–20
Воспроизведение нелинейной характеристики	Да	Да	Да	Да	Нет
Основное применение	Общего назначения	Высокоточн.	Вспомог.	Вспомог.	Вспомог.

Одним из основных преимуществ металлокерамических потенциометров по сравнению с проволочными и пластмассовыми является возможность эксплуатации при высоких температурах. Технология позволяет изготавливать элементы, рассчитанные на рабочую температуру + 200 °С и могут работать непродолжительное время при + 300 °С. Рабочая температура проволочных и пластмассовых обычно не выше + 125 °С и + 150 °С. В среднем температурном диапазоне металлокерамические и проволочные потенциометры ведут себя приблизительно одинаково, но при температуре выше + 150 °С работают только металлокерамические потенциометры, сохраняя хорошую стабильность. Испытания показали, что при данных температурах и при электрической нагрузке в течение 10 000 ч наибольшее изменение величины сопротивления порядка 0,5 – 1 % наблюдается в течение первых 100 ч, при этом максимальное изменение сопротивления после 1000 ч непрерывной нагрузки 0,5 Вт при 125°С не превышает + 7 % (средняя величина + 3 %).

Эксплуатация прецизионных металлокерамических потенциометров при температуре выше +150 °С ограничивается только температурным пределом используемых смазок.

Сравнение свойств различных типов непроволочных резисторов и прецизионных потенциометров представлено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение свойств различных типов непроволочных резисторов и прецизионных потенциометров

Рабочие характеристики		Проволочные	Металлокерамические	Пластмассовые	Металлопленочные
1		2	3	4	5
Электрические	Диапазон сопротивлений	3	5	5	2
	Характеристики по переменному току	4	5	5	5
	Мощность	4	5	5	3
	Электрическая прочность	5	5	5	5
	Сопротивление изоляции	3	5	4	5

Окончание табл. 2

	1	2	3	4	5
Точностные	Линейность	5	4	4	4
	Разрешение	4	5	5	5
	Электрический угол	5	4	4	4
	Мертвый ход	4	5	5	5
	ТКС	5	4	3	4
	Начальный скачок напряжения	5	4	4	4
	Сопrotивление выводов	4	5	5	5
	Шумы	4	5	5	5
Механические	Размеры и вес	3	5	4	3
	Моменты вращения	4	5	5	5
	Скорость поворота	4	5	5	5
	Механический угол	5	3	3	3
	Вероятный срок службы (полное число оборотов)	1	4	5	2
Устойчивость к воздействиям окружающей среды	Влажность	4	5	3	5
	Вибрации, удары, ускорение	4	5	5	5
	Срок службы	5	5	4	5
	Тепловой удар	5	5	4	5
	Повышенная температура	3	5	4	5
	Пониженная температура	4	5	5	5
Прочие свойства	Получение нелинейной функции	5	5	5	4
	Введение дополнительных шунтирующих сопротивлений	3	5	4	3
	Наличие короткозамкнутых участков резистивных элементов	3	5	4	5
	Отводы напряжения	5	5	4	3
	Отводы тока	5	4	3	2

Оценка свойств резисторов производилась по пятибалльной шкале (наилучшее качество оценивается как 5). В табл. 2 отмечены наиболее существенные различия по основным электрическим характеристикам, точности и рабочим параметрам. Приведены сравнительные данные по размерам, весу и ожидаемому сроку службы.

Диаграмма, построенная по данным табл. 2, представлена на рис. 2.

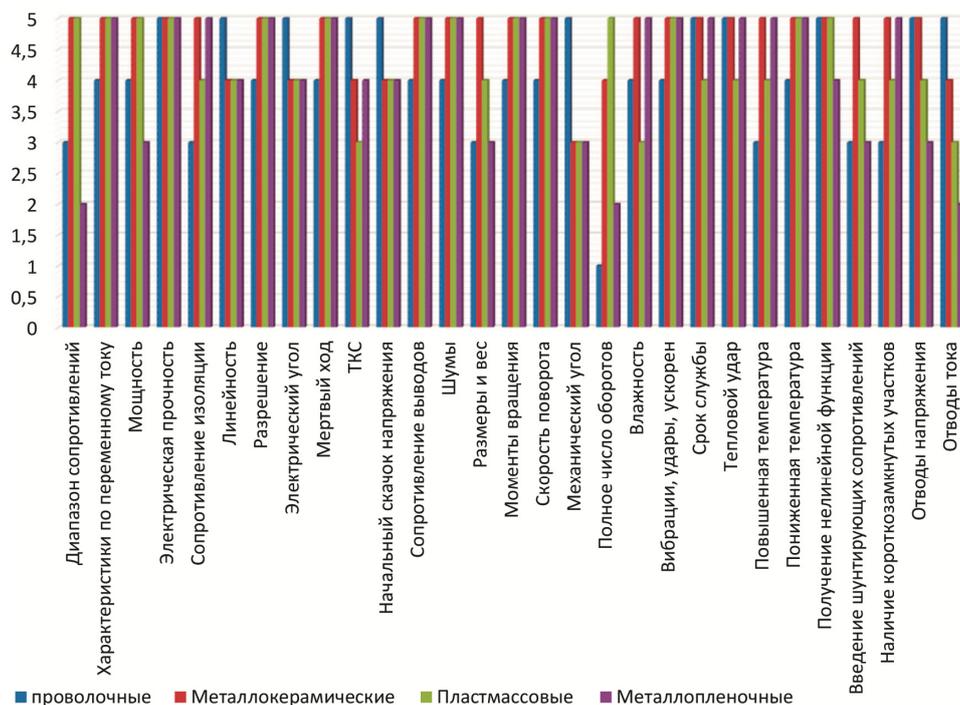


Рис. 2. Сравнительные характеристики резисторов, изготовленных на основе различных технологий

Данная диаграмма наглядно отражает совокупное преимущество резисторов, построенных на основе различных технологий.

Наилучшие значения ТКС среди непроволочных потенциометров имеют металлокерамические и металлопленочные. Они обеспечивают ТКС в широком диапазоне величин сопротивлений не хуже $\pm (100-400) \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Пластмассовые пленки в большинстве случаев обладают большим отрицательным ТКС от 300×10^{-6} до $-1000 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, у металлокерамических резисторов ТКС имеет более широкий разброс, чем у лучших проволочных, но он перекрывает больший диапазон сопротивлений. Если разброс ТКС для проволочных потенциометров от $\pm 100 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ до $\pm 800 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, то у металлокерамических минимум ограничивается значением $\pm 400 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. При этом номинал металлокерамических и пластмассовых потенциометров находится в пределах от 10 Ом до 10 МОм, а у проволочных до 100 кОм.

Особенности технологии изготовления потенциометров с керметным резистивным элементом

Кермет дает возможность получить непроволочный, неиндуктивный, неорганический резистивный элемент, почти с бесконечной разрешающей способностью, способный работать при повышенных температурах. Также кермет дает низкий ТКС, хотя и не такой, как в некоторых проволочных или даже металлопленочных потенциометрах. Однако кермет дает возможность получить более высокие пределы сопротивлений в малых габаритах, низкие шумовые и лучшие высокочастотные характеристики, хорошую воспроизводимость и надежность [4].

В табл. 3 дается сравнение свойств типовых металлокерамических резисторов с проволочными.

Таблица 3

Сравнение свойств типовых металлокерамических резисторов с проволочными

Тип резисторов	Металлокерамический	Проволочный
Предел сопротивлений	От 10 Ом до 100 кОм	От 10 Ом до 100 МОм
Шумовые характеристики	Средние	Низкие / средние
Разрешение	Высокое	Среднее
Цена	Низкая / средняя	Высокая
Максимальная нагрузка	5 Вт	5 Вт
Окружающая температура под нагрузкой	От 125 до 175 °С	125 °С
Максимальная окружающая температура / перегрев	275 °С	175 °С
Стабильность под нагрузкой	Высокая	Высокая
Износоустойчивость	Средняя	Высокая
Влагоустойчивость	Высокая	Высокая
Термостабильность	Высокая	Высокая

Материалы, используемые в металлокерамических резисторах, по своей природе способны работать при более высоких температурах, чем материалы проволочных или пластмассовых резисторов, и, соответственно, они могут рассеивать гораздо большую мощность. Рассеяние мощности металлокерамических потенциометров в 3–4 раза больше рассеяния мощности проволочных потенциометров и потенциометров из проводящей пластмассы [3]. Номинальная мощность проволочных потенциометров обычно ограничивается температурными характеристиками органических покрытий каркаса или самого материала каркаса, в то время как номинальная мощность пластмассовых потенциометров ограничивается температурой пластмассового связующего. Металлокерамические потенциометры могут работать с перегрузкой до 30–40 Вт в течение короткого промежутка времени.

Теоретически металлокерамические потенциометры можно получить с очень точным допуском номинального сопротивления, так как его значение можно регулировать. Применение сравнительно высоких напряжений приводит к микросварке частиц металлов или окислов и уничтожению диэлектрических барьеров, тем самым снижая величины сопротивлений. Производственными методами можно получить сопротивление с допуском $\pm 10\%$. Для получения допуска порядка $\pm 5\%$ и менее регулировку можно производить с помощью пескоструйного инструмента. В прецизионных схемах может быть использован процесс регулирования сопротивления даже после законченной сборки и герметизации.

Чтобы повысить величину сопротивления, необходимо удалить резистивный материал. Из-за небольших физических размеров резисторов для этой цели кроме пневмоабразивных систем можно использовать алмазные сверла.

Воспроизводимость характеристик зависит от толщины пленки и точности регулирования температуры, причем окончательное удельное сопротивление резистивной пленки зависит от соотношения проводящей и связующей фаз.

Намного сложнее дело обстоит с получением высокой линейности, так как существующие методики не позволяют корректировать функциональную характеристику изделия после изготовления резистивного элемента и, как следствие, этот факт предъявляет повышенные требования к процедурам технологического процесса, таких как контроль равномерности нанесения керметной пасты на подложку и пр.

Еще одним существенным преимуществом керметной технологии является то, что металлокерамический элемент имеет большой срок службы, в течение которого он дает небольшое изменение линейности, общего сопротивления, шума и величины реактивных составляющих полного сопротивления.

Также металлокерамические резистивные элементы обладают хорошей устойчивостью к катастрофическим выходам из строя, исключительным химическим и электрическим противодействием водяным парам и большинству других жидкостей. На обожженный резистивный элемент не действует радиация и окислительная среда. Объясняется это тем, что стеклянная матрица металлокерамического резистивного элемента и основание из стеатита способствуют защите резистора от проникновения влаги. Проволочные и пластмассовые потенциометры испытывают изменение сопротивления и падение сопротивления изоляции при влажности из-за сравнительно большого поглощения влаги материалами покрытия. Металлокерамические потенциометры обеспечивают изменение сопротивления не более 20 % после 50-суточного пребывания при 98 % влажности. При этом металлокерамический резистивный элемент хорошо выдерживает вибрацию, так как он почти не изнашивается. Основной износ наблюдается в конструкции с контактом [5].

Заключение

Таким образом, исследования показали, что наиболее перспективными во всех отношениях являются металлокерамические пленки по сравнению с другими типами непроволочных резистивных элементов.

Развитие данной технологии позволяет создать весьма миниатюрные подстроечные потенциометры с бесконечной разрешающей способностью. Теоретически предел разрешающей способности существует, так как у них имеет место некоторая «зернистость», но с помощью измерительных приборов обнаружить ее не представляется возможным. Поэтому разработка непроволочных переменных резисторов на основе металлокерамики является перспективным направлением, так как позволяет создать изделия с высокими эксплуатационными характеристиками.

С целью развития технологии целесообразным является продолжение работы в направлениях:

- реализации управления процессом нанесения металлокерамических паст в плане формирования элемента с требуемыми параметрами линейности функциональной характеристики;
- повышения точности поддержания температуры обжига в печах;
- продолжения исследований электрофизических свойств металлокерамики;
- улучшения воспроизводимости параметров;
- поиска новых металлокерамических материалов.

Все это обеспечит возможность создания прецизионных потенциометров с принципиально новыми требованиями по точности, надежности и качеству.

Список литературы

1. Доросинский А. Ю., Недорезов В. Г. Проводящие пластические материалы, используемые для построения резистивных элементов потенциометров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 229–230.
2. Доросинский А. Ю., Данилова Е. А., Герасимов О. Н. [и др.]. Способы улучшения механических характеристик резистивных элементов и методы их расчета // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1. С. 84–92.

3. Доросинский А. Ю., Недорезов В. Г. Особенности изготовления металлокерамических резистивных элементов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 230–231.
4. Белевцев А. Т. Потенциометры. М. : Машиностроение, 1969.
5. Доросинский А. Ю., Герасимов О. Н., Березин М. Н. Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 37–42.

References

1. Dorosinskiy A.Yu., Nedorezov V.G. Conductive plastic materials used for the construction of resistive elements of potentiometers. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:229–230. (In Russ.)
2. Dorosinskiy A.Yu., Danilova E.A., Gerasimov O.N. [et al.]. Ways to improve the mechanical characteristics of resistive elements and methods of their calculation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2018;(1):84–92. (In Russ.)
3. Dorosinskiy A.Yu., Nedorezov V.G. Features of manufacturing of metal-ceramic resistive elements. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:230–231. (In Russ.)
4. Belevtsev A.T. *Potentsiometriy = Potentiometers*. Moscow: Mashinostroenie, 1969. (In Russ.)
5. Dorosinskiy A.Yu., Gerasimov O.N., Berezin M.N. Investigation of the impact of vibration loads on structural materials of electronic equipment products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2017;(3):37–42. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Юрьевич Доросинский

кандидат технических наук,
генеральный директор,
Научно-производственное предприятие «Сонар»
(Россия, г. Пенза, ул. Центральная 1В)
E-mail: antik_r13@mail.ru

Олег Владимирович Прокофьев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный технологический
университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: prokof_ow@mail.ru

Ирина Юриевна Семочкина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный технологический
университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: ius1961@gmail.com

Anton Yu. Dorosinskiy

Candidate of technical sciences,
general manager,
Scientific and production enterprise "Sonar"
(1V Tsentralnaya street, Penza, Russia)

Oleg V. Prokofev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of informational technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukov's passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Irina Yu. Semochkina

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of informational technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukov's passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 30.08.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.09.2021

Принята к публикации/Accepted 15.11.2021