РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 77 листов формата А4, 17 рисунков, 5 таблиц, список использованных источников содержит 12 наименований, 3 приложения.

Ключевые слова: керметный резистор, технологический процесс, технические характеристики керметных резисторов, исследование свойств паст на основе соединений рутения.

Объектом исследования технология изготовления керметных резисторов и поиск решений для повышения ее качества.

Целью данной магистерской диссертации является рассмотрение современных тенденций и достижений в области технологии изготовления керметных резисторов с целью повышения их качества. Акцент будет сделан на новых материалах, методах синтеза, производственных процессах и методах контроля качества, которые могут привести к улучшению характеристик этих элементов.

Отражены результаты экспериментальных исследований свойств паст на основе соединений рутения.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5
1 Анализ технологического процесса производства керметных резисторов 6
1.1 Особенности структуры керметного резистора 6
1.2 Особенности технологического процесса производства керметных резисторов 8
1.3 Контроль качества и механическая обработка готовых изделий 14
2 Анализ технических характеристик и инновации в разработке керметных резисторов 22
2.1 Основные технические характеристики керметных резисторов 22
2.2 Проблемы и возможные пути решения повышения уровня технических характеристик 23
2.3 Современные тенденции и инновационные разработки в области керметных резисторов 25
3 Способы повышения качества технологических процессов при изготовлении керметных резисторов 29
3.1 Исследование зависимости разброса электрического сопротивления от технологических факторов 29
3.2 Выявление наиболее влияющих факторов на качество технологического процесса 34
3.3 Исследование свойст паст на основе соединений рутения 40
4 Управление освещением 46
4.1 Управление внутренним освещением 46
4.2 Управление наружным освещением 47
4.3 Осветительные приборы и электроустановочные устройства 48
Заключение 54
Список использованных источников 55
Приложение А. Техническое задание на ВКР 56

Приложение Б. Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность……..60

Приложение В. Презентация ВКР……64

ВВЕДЕНИЕ

Керметные резисторы являются важным элементом в электронике, широко применяемым в различных устройствах для управления током и напряжением. Качество этих резисторов напрямую влияет на производительность и надежность электронных систем. В свете постоянного развития технологий и повышенных требований к эффективности устройств существует постоянная потребность в улучшении технологии изготовления керметных резисторов. Целью данного исследования является рассмотрение современных тенденций и достижений в области технологии изготовления керметных резисторов с целью повышения их качества. Акцент будет сделан на новых материалах, методах синтеза, производственных процессах и методах контроля качества, которые могут привести к улучшению характеристик этих элементов.

В процессе исследования будут рассмотрены актуальные проблемы, с которыми сталкиваются производители керметных резисторов, а также предложены практические подходы и рекомендации по оптимизации технологических процессов. Предполагается, что повышение качества изготовления керметных резисторов не только улучшит их производительность, но также снизит вероятность дефектов, что крайне важно для обеспечения долговечности и стабильности работы электронных устройств.

1 Анализ технологического процесса производства керметных резисторов

1.1 Особенности структуры керметного резистора

Керамический резистор – это тип резистора, в котором сопротивление создается с использованием керамического материала.

Конструкция керметного резистора изображена на рисунке 1

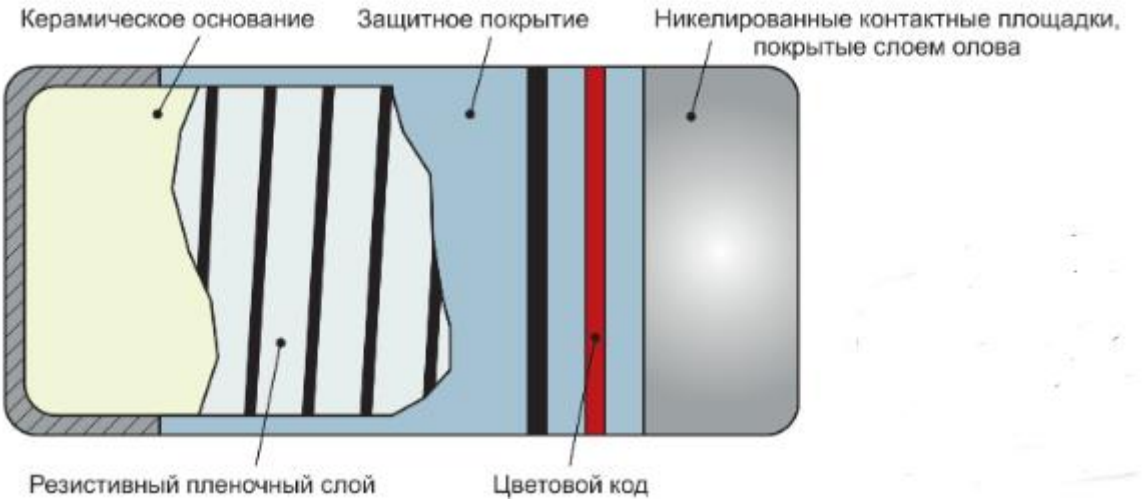

Рисунок 1 – Конструкция керметного резистора

Основные особенности структуры керметного резистора:

1) основной материал: керметные резисторы обычно изготавливаются из оксидов металлов, таких как оксиды тантала, никеля или цинка; материалы выбираются в зависимости от требований к рабочим характеристикам резистора;
2) оболочка: резистор имеет оболочку из керамического метариала, которая обеспечивает механическую прочность и защиту от внешних воздействий;
3) покрытие: на поверхности керамической оболочки обычно наносится слой металла для создания электрического сопротивления, это металлическое покрытие может быть сплавом или оксидом металла;
4) обмотка: в зависимости от требуемого значения сопротивления внутри резистора может быть создана специальная обмотка, которая представляет собой свернутый слой проводящего материала;

5) концевые подключения: концы резистора покрыты металлическими кольцами или другими подключениями для соединения с электрической цепью;
6) маркировка: керметные резисторы могут иметь маркировку; указывающую на их номинальное сопротивление, допуск, температурный коэффициент и другие характеристики.

Эти особенности обеспечивают стабильность и надежность работы керамических резисторов в различных электрических цепях

Существует несколько типов керамических резисторов, таких как углеродные, слойные и металлооксидные.

Углеродные резисторы с одержат углеродные частицы, металлоксидные резисторы используют оксиды металлов, а слойные резисторы формируются путем нанесения металлических слоев на керамическую подложку. Эти элементы конструкции обеспечивают стабильность работы керамических резисторов в различных условиях и их применимость в разнообразных в электрических цепях [1].

Электрическая проводимость по этой модели осуществляется через цепочки проводящих частиц, разделённых стеклянными прослойками. Эти прослойки (барьеры) настолько тонки, что проводимость контролируется туннельными процессами. Таким образом, минимум на кривой зависимости *R=f(T)* является результатом наложения двух процессов: уменьшения проводимости металлической части цепочек с ростом температуры и увеличением "активационной"– доли барьерной проводимости (формула 1):

$$R(T) = R_m(T) + R_б(T) \quad (1)$$

где R_m – сопротивление проводящей фазы;

$R_б$ – сопротивление барьера.

Другой подход к объяснению электропроводности в керметных системах основывается на прыжковом механизме проводимости аморфонй базы композиционного слоя, этот взгляд базируется также на интерпретации

характерной для толстопленочных резисторов параболической зависимости сопротивления от температуры (рисунок 2).

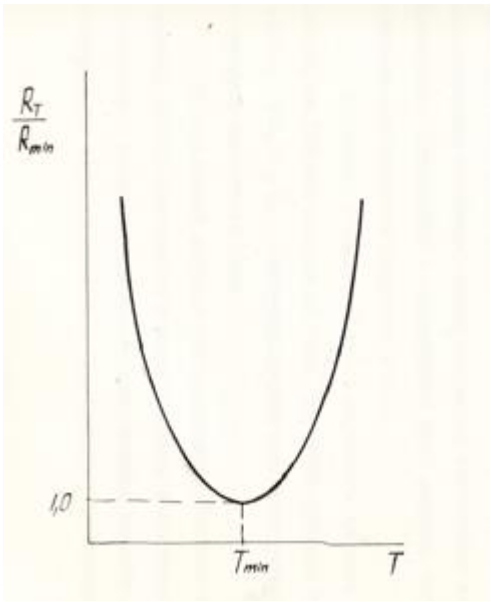

Рисунок 2 – Типовая зависимость *R=f(T)* керметных резисторов

Исключаем возможность осуществления проводимости через цепочки проводящих частиц и получается модель смешанной проводимости, по которой проводящие частицы равномерно взвешены в «плохопроводящей» фазе стекла, в результате диффузии ионов металла или за счет разрушения химических связей в стекле в такой «плохопроводящей» фазе могут образовываться ловушки или локализованные состояния энергетических уровней [2].

1.2 Особенности технологического процесса производства керметных резисторов

Электрические свойства резистивных композиций существенно улучшаются, если механическое дробление и смешивание компонентов заменить процессом, позволяющим формировать тонкую, однородную микрокомпозиционную структуру на изоляционном основании методами термического испарения, катодного или ионноплазменного распыления. Высокие электрические параметры тонких пленок, получаемых данными методами, а также возможность варьировать свойствами пленок в широком диапазоне, корректируя их состав и технологический режим обработки,

позволили создать прецизионные резисторы с широким диапазоном номинальных сопротивлений, низким ТКС и уровнем собственных шумов.

Керметные и металлизированные прецизионные резисторы имеют, как правило, более высокую рабочую температуру и удельные нагрузки по сравнению с углеродистыми прецизионными резисторами, что обусловлено большей термостойкостью керметных пленок с микрокомпозиционной структурой по сравнению с пленками пиролитического углерода. В то же время отметим, что особенностью керметных тонкослойных резисторов является их невысокая устойчивость к импульсным нагрузкам, в импульсном режиме работы в отдельных местах микрокомпозицонной структуры могут иметь место локальные перегревы, приводящие к изменению сопротивления резистора. Технологический процесс производства прецизионных постоянных резисторов на основе микрокомпозиции состоит из следующих основных этапов: обработка изоляционных оснований перед нанесением проводящей пленки; нанесение проводящей пленки на изоляционное основание; термообработка полученных РЭ; армирование покрытых пленкой оснований, нарезка спиральной канавки на проводящей пленке; электрическая тренировка РЭ; нанесение защитного покрытия на РЭ; контроль качества резисторов.

Изоляционные основания для прецизионных резисторов цилиндрической конструкции представляет собой толстостенные трубки из керамики, получаемые протяжкой тестообразной керамической массы через направляющие с последующей термообработкой при высокой температуре. Именно керамические материалы нашли широкое применение в качестве изоляционных оснований для прецизионных резисторов с микрокомпозиционной термостойкой пленкой вследствие их высокой термостойкости, механической прочности, хорошей стабильности свойств при температурных воздействиях, изменениях влажности и давления, а также благодаря малому коэффициенту линейного расширения и незначительным диэлектрическим потерям в полях высокой частоты. Основными компонентами керамических масс являются окисные материалы.

Качество резистора в значительной степени определяется состоянием поверхности керамического основания, его составом. В керамике, содержащей большое количество таких окислов щелочных металлов, как Na20, К2О, могут развиваться интенсивные электрохимические процессы. Наличие окислов щелочных металлов в керамическом основании при длительной эксплуатации приводит к необратимому изменению значения сопротивления резисторов за счет электролитической проводимости. При нагрузке резисторов постоянным током (особенно в условиях повышенных температур) происходит перенос ионов щелочных металлов в электрическом поле. Процесс накопления щелочных металлов сопровождается их окислением, объем продуктов электролиза под проводящей пленкой увеличивает, что может привести к разрушению ее отдельных участков

Современная технология производства позволяет получать керамические основания с достаточной механической прочностью и хорошими изоляционными свойствами. В керамических материалах, разработанных для прецизионных резисторов, доведено до минимум содержание окислов щелочных металлов.

Обжиг оснований производится по общепринятой технологии керамического производства с соблюдением необходимых предосторожностей для достижения определенного микрорельефа поверхности. Большая (около 20–25%) усадка керамической заготовки после обжига, а также различная плотность керамической массы на отдельных участках керамики приводят к значительным отклонениям изоляционного основания от заданной геометрической формы. В связи с этим проводится точная шлифовка оснований по внешнему диаметру с целью обеспечения заданных для РЭ геометрических размеров. На концах изоляционные основания должны иметь небольшие фаски для последующей напрессовки контактных колпачков. Эти фаски делаются после обжига, чтобы избежать механических повреждений боковой рабочей поверхности оснований. Снятие фасок производится путем галтовки изоляционных оснований в барабанах с водой и абразивным порошком после первой грубой шлифовки на

бесцентровом шлифовальном станке. Однако при галтовке частично разрушается боковая поверхность оснований, поэтому режим галтовки подбирают так, чтобы при дальнейшей шлифовке на поверхности оснований были бы сняты все механические дефекты, возникающие при галтовке.

После галтовки шлифовка боковой поверхности оснований проводится на станке за три – четыре прохода, причем два последних прохода являются чистовыми, осуществляются с меньшим съемом материала заготовки. Поскольку при шлифовке с поверхности керамических оснований удаляется плотный поверхностный слой материала и вскрываются участки, обладающие повышенной пористостью, то эмульсия, используемая при данной операции, должна содержать минимальное количество органических веществ. Органические вещества (масла и т. п.) могут проникать в поры керамического материала, а в дальнейшем при обжиге керамических оснований обугливаются, при этом на поверхности визуально обнаруживаются темные точки. В производстве прецизионных резисторов важно, чтобы были отбракованы изоляционные основания, в которых органические вещества проникают в поры керамики: резисторам, выполненным на основаниях с указанным дефектом, свойственно значительное изменение сопротивления при воздействии электрической нагрузки. Для выявления оснований со вскрытой при шлифовке пористостью их прокаливают при температуре 1110–1120 К, при этом в местах проникновения органических веществ в поры керамики появляются темные разводы и серые точки – такие образцы исключают из дальнейшего технологического процесса производства прецизионных резисторов.

Для получения однородного микрорельефа оснований последние подвергаются полировке обкаткой с водой в дубовых барабанах. После проведения полировки основания должны быть промыты в проточной воде при непрерывном перемешивании в сетчатых пластмассовых или деревянных барабанах для удаления продуктов полировки. При изготовлении прецизионных резисторов обычно используются ультразвуковые устройства для мойки, позволяющие осуществить практически полное удаление с изоляционных

оснований всех загрязнений, далее основания сушатся в центрифуге. Полированные основания подвергают повторному обжигу (оплавлению) для обеспечения заданного однородного микрорельефа поверхности. Каждой группе оснований устанавливается определенная температура оплавления, обеспечивающая наилучшие электрические характеристики – низкий коэффициент старения, ТКС, э.д.с. шумов. В результате оплавления поверхность основания приобретает стекловидный характер, что позволяет получать высококачественную проводящую пленку без разрыва. Для создания проводящей пленки используют специальные сплавы, состоящие из нескольких компонентов (*Si, Fe, Cr, Ni* и др.), взятых в определенных процентных соотношениях

Проводящие пленки с высоким удельным сопротивлением получают при использовании в качестве исходного материала порошкообразной смеси сплава и окислов, обладающих значительным удельным сопротивлением. Для испарения в смеси со сплавами часто используются двуокиси титана, кремния, окиси железа, алюминия, хрома, кадмия, кобальта, никеля. Удельное сопротивление пленки и ее ТКр в этом случае определяются соотношением между сплавами и окислами

В технологии производства керметных тонкослойных резисторов, как отмечалось, для создания проводящих пленок широко используется термическое испарение различных сплавов в вакууме, которое проводится на специальных установках. Внутри каркаса установки находится блок для питания испарителя, мотор с редуктором для приведения во вращение керамических оснований в процессе испарения, а также вакуумный агрегат. Нанесение проводящей пленки осуществляется в рабочих камерах. В центре вакуумной камеры помещается испаритель в виде спирали, на который наносится жидкая суспензия из порошка резистивного материала, а при нанесении электрофорезом в суспензию добавляется клеящее вещество. Перед нанесением пленок керамические изоляционные основания на специальном полуавтомате помещаются на спицы, устанавливаемые затем в рабочую камеру. Конструкция устройства рабочей

камеры, используемого для нанесения проводящих пленок методом термического испарения в вакууме. Изоляционные трубчатые основания устанавливаются на металлические спицы, которые вращаются с помощью общей ведущей шестерни, имеющей зацепления с малыми шестернями по оси рабочей камеры установлен испаритель. Верхние концы спиц входят в направляющие отверстия столика. Когда давление в рабочей камере снизится до $3 * 10^{-2}$Па, проводят прогрев деталей подколпачного устройства и загруженных оснований, при этом включают механизм, вращающий спицы с основаниями; прогрев осуществляется за счет лучеиспускания испарителя при нагреве его электрическим током. Температуру нагрева устанавливают значительно ниже температуры начала испарения резистивного материала, нанесенного на испаритель. Подобный режим работы испарителя в течение 15–20 мин обеспечивает нагрев керамических оснований до температуры 520–570 К. Испарение обычно осуществляется за два цикла, при импульсном нагреве испарителя – за время 25–30 с. Значение тока, протекающего по испарителю, увеличивают плавно от 0 до 60–70 А. Между первым и вторым циклом испарения делается перерыв 10–15 мин в нагреве испарителя. Такой режим напыления обеспечивает выполнение прецизионных РЭ с хорошо повторяющимися характеристиками

Получение равномерного по толщине сплава достигается вращением держателей с керамическими основаниями вокруг собственной оси, передача вращательного движения в рабочую камеру испарителя производится при помощи специального механизма

После металлизации производят термообработку части заготовок, определяют сопротивление и температурный коэффициент заготовок и по их значениям подбирают режим для термообработки всей партии. Для стабилизации свойств проводящей пленки и улучшения ее сцепления с керамическим основанием производится термическая обработка металлизированных заготовок в конвейерных печах с автоматической регулировкой и регистрацией температурного режима

Армировка резисторов производится на высокопроизводительных автоматах, после армировки производится автоматическая раскалибровка заготовок на группы по значению сопротивления

Для увеличения сопротивления и подгонки к требуемому номинальному значению на металлизированных заготовках создается спиральная канавка с помощью специально оборудованных нарезных станков. Станки снабжены приборами для контроля значения сопротивления в процессе нарезки. Когда значение сопротивления заготовки достигает расчетного, автоматически производится отвод каретки с РЭ от диска

Для каждого типа резистора разработаны таблицы нарезки, по которым из требуемого и исходного значения сопротивления заготовки определяют шаг нарезки. Максимально допустимое число витков определяется качеством поверхности керамического основания и технологическими возможностями оборудования. Минимально допустимое число витков определяется из условий обеспечения равномерного нагрева поверхности резистора при нагрузке, а также равномерной плотности тока по спирали

При изготовлении резисторов, предназначенных для работы в импульсном режиме, применяют заготовки с максимально допустимым числом витков. Для уменьшения неравномерности распределения плотности тока по проводящему слою в отдельных случаях применяется двух- и трехзаходная нарезка изолирующих канавок, применяются автоматы, нарезающие изолирующие канавки с неравномерным шагом, что позволяет получить более равномерный нагрев поверхности резистора при электрической нагрузке. Для получения керметных прецизионных резисторов применяют различные способы подгонки значения сопротивления к номинальному. Наиболее распространены способы подгонки, основанные на механическом удалении [3].

1.3 Контроль качества и механическая обработка готовых изделий

Контроль качества – это важнейшая часть производственного процесса, которая обеспечивает соответствие готовых изделий заданным техническим характеристикам, надежность, долговечность и безопасность применения.

Механическая обработка и контроль позволяют устранить дефекты, обеспечить правильные геометрические параметры и подготовить изделие к эксплуатации

Производство керметных резисторов включает множество этапов, каждый из которых требует высокого уровня контроля для обеспечения соответствия продукции установленным стандартам и требованиям. На завершающих стадиях изготовления особое внимание уделяется механической обработке поверхности, нанесению контактных элементов и проведению комплекса контрольных процедур. Это необходимо для гарантии надежности, долговечности и стабильности электропараметров изделия в условиях эксплуатации.

Обеспечение высокого качества включает:

– точное измерение сопротивления и других электропараметров;

– механическую обработку поверхности для устранения дефектов;

– нанесение контактных элементов для надежных электрических соединений;

– визуальный и автоматический контроль качества;

– подготовку к упаковке и маркировке.

Далее подробно рассмотрим каждый из этих этапов

Методы контроля сопротивления и электропараметров

Цели:

– установить, что сопротивление изделия соответствует заданным номиналам и допускаемым отклонениям;

– обеспечить стабильность сопротивления при различных условиях эксплуатации (температурных, влажностных, механических);

– предотвратить попадание в партию изделий с браком, что снизит риск отказов в эксплуатации;

Подготовительные мероприятия:

– после механической обработки поверхность очищают от загрязнений, жиров, пыли, чтобы избежать искажения результатов;

– используют очищающие растворы или спиртовые салфетки для обезжиривания;

– перед измерением изделия оставляют в условиях, близких к рабочей температуре, чтобы исключить влияние температурных границ;

Используемое оборудование:

– мультиметры с высокой точностью (до 0,1%) или автоматические тестовые станции (АТС), предназначенные для массового тестирования;

– измерительные щупы или зажимы, обеспечивающие надежный контакт без повреждения поверхности;

– калибровочные образцы для проверки точности приборов;

Процедура:

– изделие закрепляют в тестовой станции;

– контакты прибора подключают к контактным площадкам или выводам резистора;

– производят измерение сопротивления R;

– результат сравнивают с заданным диапазоном значений согласно техническому заданию;

Дополнительные параметры:

– проводится измерение сопротивления при разных температурах (например, -55°C, +25°C, +125°C) для оценки температурной стабильности;

– в случае необходимости – измерение сопротивления при повышенной нагрузке (например, при токе, приближающемся к Pmax) для выявления возможных дефектов;

Графические материалы:

– график зависимости сопротивления *R(T)*, показывающий стабильность сопротивления при изменениях температуры;

– диаграмма измерительной схемы;

Помимо сопротивления, проверяют:

– мощность рассеяния (*Pmax*): изделие не должно разрушаться или изменять параметры при максимально допустимой мощности;

– температурную стабильность: изменение сопротивления при различных температурах;

– индуктивность и емкость (если применимо): важны для высокочастотных применений.

Параметры:

– мощность: проверка с помощью специальных тестеров, которые могут подавать токи, близкие к *Pmax*;

– температурное тестирование: нагрев или охлаждение изделия в климатической камере с одновременным мониторингом сопротивления;

– долговременные испытания: тестирование при длительном токе или напряжении, чтобы выявить деградацию;

Техническое оснащение:

– климатические камеры для проведения тестов при жестких температурных режимах;

– специализированные системы автоматического сбора данных;

– механическая обработка поверхности и нанесение контактных элементов;

Механическая обработка поверхности

Задачи:

– удалить микротрещины, царапины, дефекты, появившиеся в процессе производства;

– обеспечить гладкую, однородную поверхность для надежного контакта и защиты от коррозии;

– подготовить поверхность к последующим гальваническим или пайочным операциям;

Процедуры:

– шлифование: используют шлифовальные машины с абразивами разной зернистости. Начинают с грубых зерен (например, 600), заканчивают мелкозернистыми (например, 1200-2000);

– полировка: после шлифовки поверхность полируют до зеркального блеска, что снижает шероховатость и повышает качество контактов;

– обработка ультразвуком: для удаления остатков загрязнений и микротрещин;

Контроль качества:

– измерение шероховатости поверхности с помощью профилометра – $Ra < 0{,}2$ мкм;

– визуальный осмотр под микроскопом (микроскоп с увеличением 50-200х);

Особенности:

– обработка должна быть аккуратной, без чрезмерного механического воздействия, чтобы не возникли микротрещины, которые могут привести к отказу.

Нанесение контактных элементов

Задачи:

– обеспечить надежное электросоединение с внешней цепью;

– защитить контакты от окисления, коррозии, механических повреждений;

Методы:

– гальваника: нанесение золота, серебра или олова электролитическим способом;

– пайка: нанесение специальных паст или припоя с последующим обжигом;

– электропроводные пасты: нанесение с помощью трафарета и последующая сушка или термообработка;

Процесс:

– поверхность изделия очищают: обезжиривают и травят для повышения адгезии;

– наносится слой металла или пасты;

– выполняется обжиг или сушка при определенной температуре;

– контроль толщины слоя – обычно 1-5 мкм для гальваники, 10-20 мкм для паст;

Рекомендации:

– использовать правильные растворы и электролиты;

– контролировать параметры процесса (ток, время, температуру);

– обеспечить равномерность нанесения.

Проверка нанесенных контактных элементов

Измерение сопротивления контактов должно быть ниже допустимых границ. Механическая прочность – это испытание на растяжение и изгиб, толщина слоя контролируется с помощью микроскопа

Дополнительные мероприятия:

– испытания на коррозионную стойкость в агрессивных средах (например, солевой туман);

– проверка адгезии слоя с помощью теста на отслаивание.

Визуальный и автоматический контроль качества

Задачи визуального осмотра:

– выявить микротрещины, царапины, загрязнения, дефекты поверхности;

– проверить соответствие маркировки, наличие маркировочных меток и их читаемость;

– оценить качество нанесенных контактных элементов.

Средства:

– лупы и микроскопы (микроскоп с увеличением 50-200х);

– световые и ультрафиолетовые лампы для выявления загрязнений и микротрещин;

– визуальные инспекторы или автоматизированные системы.

Процедура:

– осмотр каждого изделия или партии;

– фиксация дефектов с помощью фотодокументации;

– отбраковка дефектных изделий.

Автоматизированные проверки

Использование автоматических тестеров, которые проводят последовательные измерения характеристик, такие как, проверка маркировки с помощью оптических систем и визуальный контроль с помощью машинных систем, использующих камеры высокого разрешения и алгоритмы распознавания.

Примеры:

– автоматическая проверка сопротивления по нескольким точкам;

– визуальный контроль маркировки, нанесенной лазером или шелкографией;

Последний этап: тестирование всей партии, в случае серийного производства проводят выборочные или полные проверки. Используют автоматизированные системы для быстрого тестирования. К задачам относятся защита изделия от механических повреждений, влажности и электростатического воздействия, также обеспечение правильной идентификации и прослеживаемости продукции. К процедурам относится: упаковка в антистатические пакеты и контейнеры, маркировка, укладка в защитные коробки для транспортировки. Подводя итоги данного раздела можно заявить, что обеспечение высокого качества керметных резисторов на завершающих этапах производства – это комплекс мероприятий, включающий: точное измерение электропараметров при различных условиях, механическую обработку поверхности для устранения дефектов и повышения надежности, нанесение контактных металлов и паст с контролем качества, визуальный и автоматический контроль для выявления дефектов, подготовка к транспортировке и хранению. Этот многоступенчатый подход позволяет выпускать продукцию, отвечающую строгим стандартам, обеспечивает ее стабильность и долговечность в условиях эксплуатации.

2 Анализ технических характеристик керметных резисторов

2.1 Основные технические характеристики керметных резисторов

Металлокерамические резисторы представляют собой важный элемент в электронике. Рассмотрим их основные технические параметры:

– номинальное сопротивление (R): сопротивление, которое резистор представляет в нормальных условиях работы; обозначается в Омах и является ключевым параметром, определяющим электрическую характеристику резистора;

– допуск (±%): максимально допустимое отклонение от номинального сопротивления; измеряется в процентах и указывает на то, насколько точно резистор соответствует заявленному номиналу;

– температурный коэффициент сопротивления (ТКС): изменение сопротивления резистора в зависимости от изменения температуры, выражается в $ppm/°C$ и указывает, насколько сильно изменится сопротивление при изменении температуры на $1°C$;

– мощность (P): максимальная мощность, которую резистор способен поглотить без повреждений, измеряется в ваттах (Вт) и определяется энергетическими потребностями конкретной цепи или устройства;

– напряжение (U): максимальное напряжение, которое резистор может выдержать без пробоя, измеряется в вольтах (В) и важно для предотвращения повреждений изоляции и обеспечения надежной работы;

– точность: мера того, насколько близко резистор поддерживает свое номинальное сопротивление, выражается в процентах и представляет собой общую дисперсию фактического и номинального сопротивлений;

– стабильность по времени: изменение характеристик резистора с течением времени, включает в себя параметры. Такие как долговременная стабильность и стабильность при циклических нагрузках;

– диапазон рабочих температур: температурный интервал, в пределах которого резистор может надежно функционировать. [4]

Некоторые технические характеристики наглядно предоставлены на рисунке 3

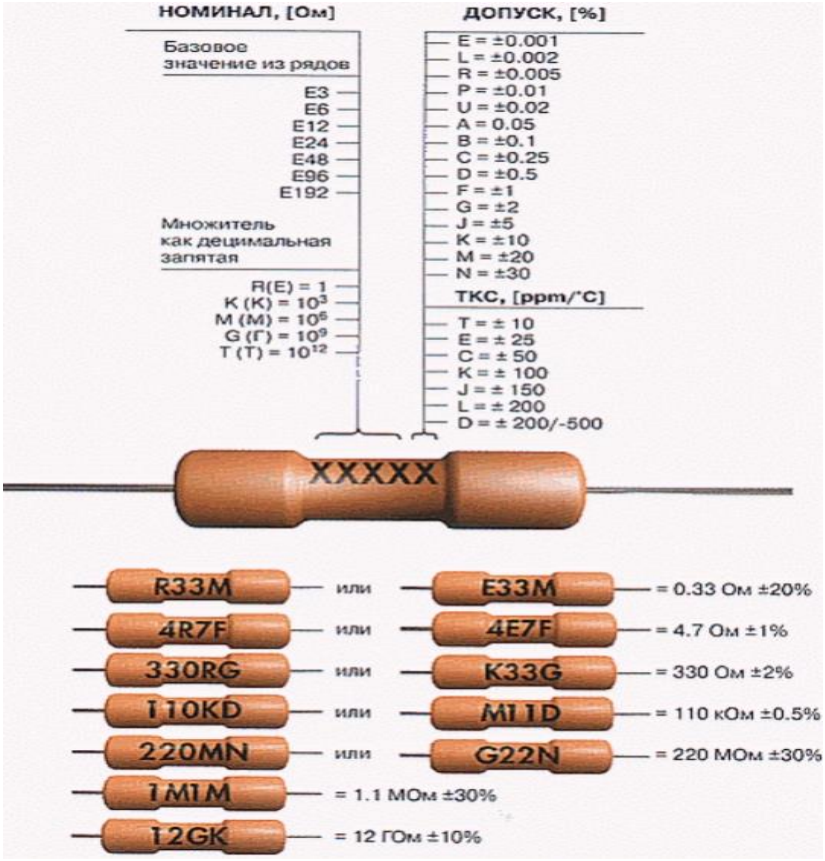

Рисунок 3 – Ряд технических характеристик керметных резисторов

2.2 Проблемы и возможные пути решения повышения уровня технических характеристик

Повышение уровня технических характеристик керамических резисторов включает в себя решение ряда проблем, связанных с электрическими, термическими и механическими аспектами. Давайте рассмотрим эти проблемы и возможные пути их решения максимально объемно:

– точность и допуск;

Проблема: Возможны отклонения от заявленного номинального сопротивления. Решение: Использование более точных методов контроля качества, а также улучшение технологий изготовления и измерения.

– температурный коэффициент сопротивления (ТКС);

Проблема: Неконтролируемые изменения сопротивления с изменением температуры. Решение: Разработка материалов с более низким температурным коэффициентом сопротивления, а также применение специальных компенсационных технологий.

– стабильность во времени;

Проблема: Возможны изменения характеристик резистора со временем. Решение: Использование стабильных материалов, применение более точных процессов производства и тестирования на стабильность во времени.
– термическое сопротивление;

Проблема: Резисторы могут нагреваться при прохождении тока. Решение: Разработка более эффективных систем охлаждения, применение материалов с высокой теплопроводностью, а также оптимизация формы и конструкции.
– стойкость к влажности и агрессивным средам;

Проблема: Воздействие влажности и химически агрессивных сред может негативно влиять на характеристики резисторов. Решение: Разработка защитных покрытий и оболочек, улучшение герметичности корпусов.

– диапазон рабочих температур;

Проблема: Ограниченный диапазон температур работы. Решение: Разработка материалов, устойчивых к экстремальным температурам, а также оптимизация процессов спекания.

– пределы рабочего напряжения;

Проблема: Ограничения по рабочему напряжению могут быть преодолены. Решение: Разработка резисторов с более высокой изоляционной прочностью, а также применение новых диэлектриков

– миниатюризация и упаковка;

Проблема: Необходимость в создании более компактных и миниатюрных резисторов. Решение: Применение технологий нано- и микроизготовления, разработка новых форм и конструкций корпусов

– стоимость производства;

Проблема: Высокие затраты на производство могут затруднить массовое производство. Решение: Оптимизация технологических процессов, использование более доступных и экономичных материалов, а также внедрение автоматизации.

– экологическая устойчивость;

Проблема: Необходимость снижения воздействия производства на окружающую среду Решение: Применение экологически устойчивых материалов и технологий, улучшение процессов утилизации и переработки [5].

Общий подход к решению этих проблем включает в себя инновации в материалах, технологических процессах и методах тестирования, а также улучшение стандартов качества и управление производственными процессами.

2.3 Современные тенденции и инновационные разработки в области керметных резисторов

Современные направления развития керметных резисторов продолжают активно эволюционировать под воздействием потребностей высокотехнологичных отраслей, таких как микроэлектроника, космическая индустрия, медицина, автомобильная промышленность, энергетика и автоматизация производственных процессов. В рамках этих тенденций особое

внимание уделяется созданию новых материалов и конструктивных решений, способных обеспечить не только высокие эксплуатационные характеристики, но и соответствовать требованиям миниатюризации, энергоэффективности и экологической безопасности.

Одним из ключевых аспектов является использование наноматериалов и нанотехнологий, позволяющих создавать керметные резисторы с уникальными свойствами. Например, наночастицы металлов и полимеров, внедренные в матрицы, существенно улучшают стабильность сопротивления, снижают тепловые потери и повышают сопротивление механическим воздействиям. Внедрение нанотехнологий также способствует развитию резисторов с высокой плотностью интеграции, что дает возможность размещать множество элементов на ограниченной площади микросхем, расширяя возможности электронных устройств.

Разрабатываются также новые композиционные материалы, обладающие низким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), высокой стойкостью к радиации и коррозии, а также устойчивостью к экстремальным условиям эксплуатации. Важным направлением является создание керметных резисторов с расширенным диапазоном рабочих температур, достигающим сотен градусов Цельсия, что необходимо для применения в ядерной энергетике, космических системах и промышленных установках, работающих в условиях высоких температур.

В области конструктивных решений активно исследуются многослойные и объемные керметные резисторы, которые позволяют добиться высокой точности и стабильности сопротивления, а также повышенной надежности и долговечности. Разрабатываются инновационные методы производства, такие как автоматизированное нанесение слоёв, лазерная и плазменная обработка, ультразвуковая сварка, что гарантирует однородность и высокое качество продукции. Важным аспектом является снижение разброса параметров, что

позволяет создавать стандартизированные компоненты для массового производства высокоточных электронных систем.

Важной тенденцией является повышение уровня автоматизации и цифровизации производства керметных резисторов. Использование автоматизированных линий, систем контроля качества в реальном времени, методов неразрушающего контроля (например, ультразвукового и рентгеновского анализа) способствует снижению стоимости изделий и повышению их однородности. Внедрение систем анализа данных и Искусственного Интеллекта позволяет предсказывать параметры и выявлять дефекты на ранних стадиях производства, что повышает надежность конечной продукции.

Миниатюризация керметных резисторов достигнута благодаря новым технологическим подходам, таким как интеграция в микросхемы, создание *SMD*-компонентов (поверхностного монтажа) и внедрение в гибкие электронные системы. Это позволяет создавать компактные, легкие и энергоэффективные устройства, которые широко применяются в носимых гаджетах, медицинской технике, беспилотных системах и робототехнике. Кроме того, разрабатываются резисторы с низким уровнем шумов, высоким быстродействием и стабильностью сопротивления при воздействии электромагнитных помех.

В условиях необходимости повышения экологической безопасности и снижения воздействия на окружающую среду особое значение приобретает использование экологически чистых материалов и технологий производства. Разрабатываются безиспортивные, безвредные для окружающей среды составы, а также технологии, минимизирующие отходы и энергопотребление. В результате создаются экологически безопасные керметные резисторы, соответствующие международным стандартам по экологической устойчивости (например, *RoHS*).

В перспективе ожидается развитие резисторов с функциями саморегуляции и самовосстановления, основанных на использовании новых материалов, изменяющихся под воздействием внешних факторов. Такие компоненты смогут автоматически компенсировать изменения сопротивления, вызванные температурой, механическими воздействиями или воздействием радиации, что значительно повышает их надежность и срок службы. Это особенно актуально для систем, работающих в экстремальных условиях или в условиях ограниченного доступа для обслуживания.

Кроме того, развивается концепция так называемых "умных керметных резисторов", оснащенных встроенными датчиками, системами мониторинга и связи, что позволяет реализовать системы удаленного контроля, диагностики и автоматической настройки параметров. Такие решения находят применение в системах промышленной автоматизации, энергетике, телекоммуникациях и системах безопасности. Внедрение технологий интернета вещей позволяет объединить множество таких компонентов в единую сеть, обеспечивая более эффективное управление и обслуживание устройств. На международном уровне активизируются усилия по стандартизации новых видов керметных резисторов, что способствует более широкому внедрению инновационных решений в промышленность и электронику. Разрабатываются стандарты по характеристикам, испытаниям, методам производства и маркировке, что повышает доверие потребителей и стимулирует развитие рынка. В целом, развитие керметных резисторов продолжается по пути повышения их точности, надежности, миниатюризации и функциональности, а также расширения диапазона условий эксплуатации. Инновационные материалы, технологические процессы, интеллектуальные функции и стандартизация позволяют создавать компоненты, способные удовлетворить требования уже существующих и перспективных электронных систем, способствуя развитию новых технологий и открывая возможности для создания более эффективных, устойчивых и экологически безопасных устройств будущего [6].

3 Способы повышения качества технологических процессов при изготовлении керметных резисторов

3.1 Исследование зависимости разброса электрического сопротивления от технологических факторов

Наряду с температурным коэффициентом сопротивления и значением удельного поверхностного сопротивления одной из важных характеристик, определяющих технический уровень керметных паст, является отклонение величины сопротивления от заданного. По проспектам иностранных фирм разброс сопротивлений керметных паст укладывается в интервал ±10, 20%.

Для керметных паст отечественного производства допустимая величина отклонения от номинального сопротивления составляет как правило ± 20%

На рисунках 4-13 приведены гистограммы распределения по допусковым группам величины сопротивления резистивных элементов различных номиналов с разной топологией, изготавливаемых в опытном производстве.

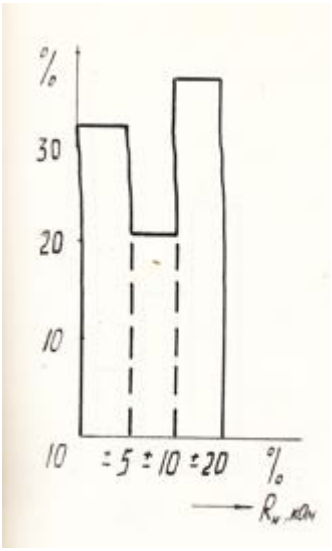

Рисунок 4 – Гистограмма 1: 10кОм, СП3-44, 0.25Вт

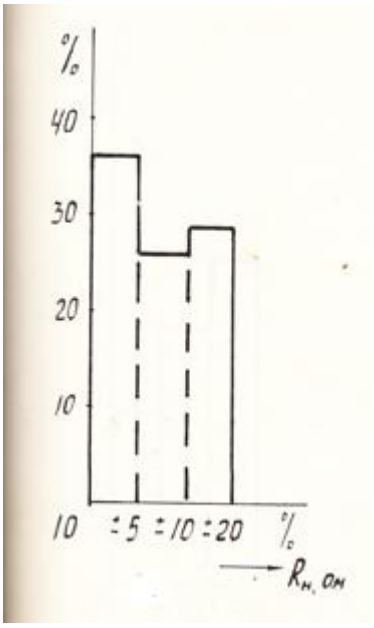

Рисунок 5 – Гистограмма 2: 10 Ом, СПЗ-44, 0.25 Вт

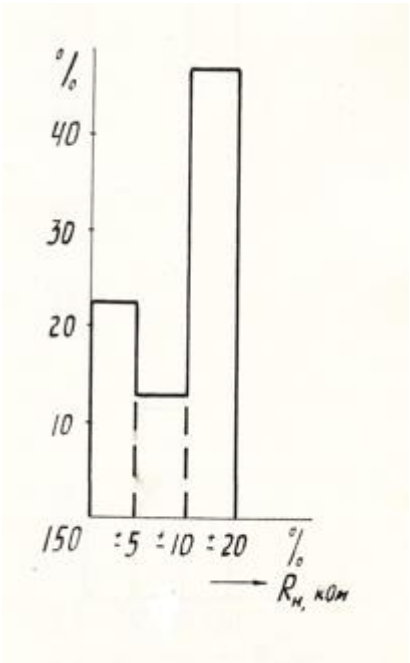

Рисунок 6 – Гистограмма 3: 150 кОм, СПЗ-44, 0.25 Вт

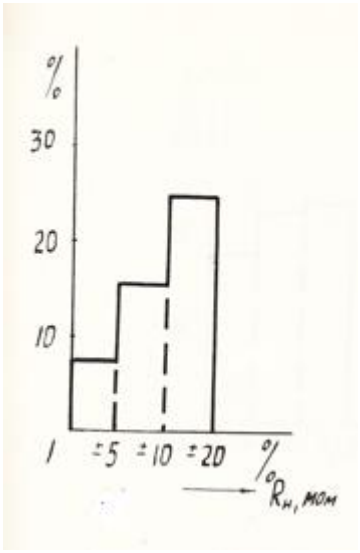

Рисунок 7 – Гистограмма 4: 1 Мом, «Эвклаз-4»

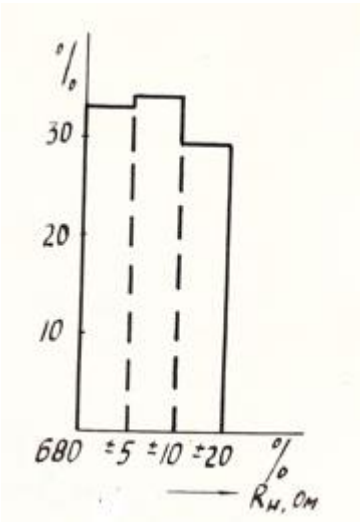

Рисунок 8 – Гистограмма 5: 680 Ом, «Эвклаз-4»

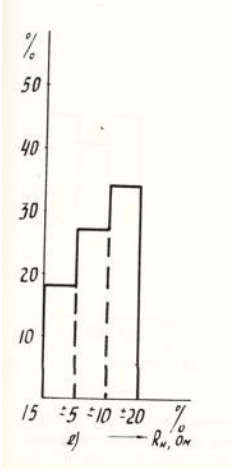

Рисунок 9 – Гистограмма 6: 15 Ом, СПЗ-37

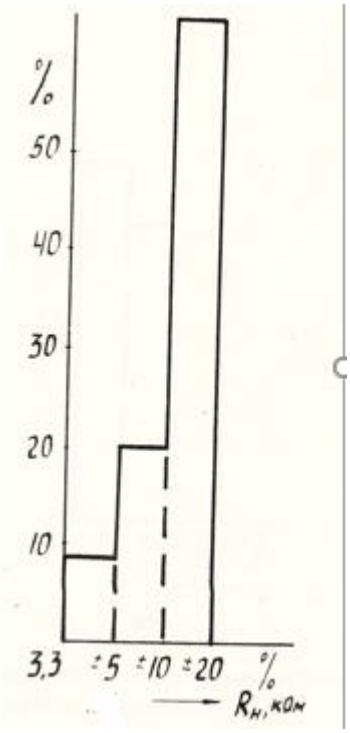

Рисунок 10 – Гистограмма 7: 3,3 кОм, СП3-37

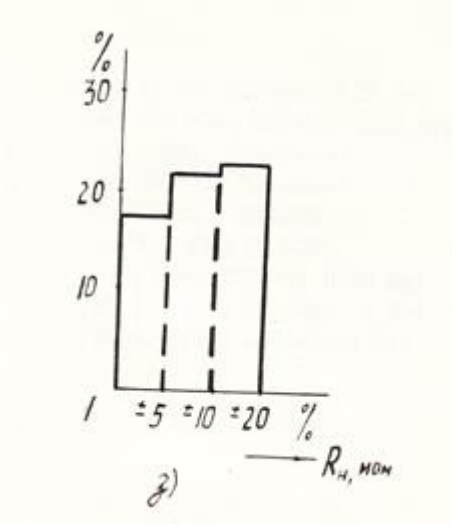

Рисунок 11 – Гистограмма 8: 1Мом, СП3-44, 0.25 Вт

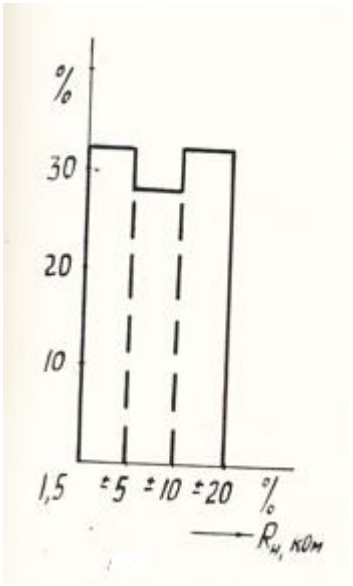

Рисунок 12 – Гистограмма 9: 1,5 кОм, СПЗ-44, 1 Вт

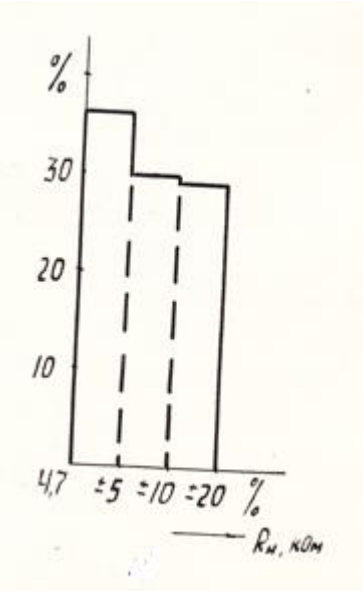

Рисунок 13 – Гистограмма 10: 4.7 кОм, СПЗ-44, 1 Вт

Одним из требований, определенных техническим заданием на данную работу, было исследование зависимости электрических параметров паст от технологических факторов и изучение возможности попадания в номинал с допуском ±10%. Решать эту проблемы необходимо в два этапа, выделив среди многообразия технологических факторов, определяющих параметры резисторов, две основные группы:

1) собственно резистивная композиция (ее состав, метод подготовки, дисперсность составляющих частей и т.д.)

2) технологические режимы печати в термообработки (скорость движения и давления ракеля, трафарет, температур отжига и т.д.).

В настоящей работе изучалось влияние второй группы технологических факторов на разброс величины сопротивления. Так как эта группа факторов относится к технологическим операциям печатания и обжига, задача сводится по сути дела к совершенствованию технологического процесса путем оптимизации операций нанесения пасты и обжига, т.е отысканием условий, при которых разброс величины сопротивления наименьший [7].

3.2 Выявление наиболее влияющих факторов на качество технологического процесса

Эксперимент проводился при значениях факторов, указанных в таблице 1

Таблица 1 – натуральные значения факторов

№ опыта	*X*1	*X*2	*X*3	*X*4	*X*5	*X*6	*X*7	*X*8	*X*9	*X*10
I	37	14,3	33	892	29	0,966	0,78	+I	Б	ФСТ
2	23	14,3	33	892	29	0,966	0,78	+I	Б	ФСТ
3	30	1,4	33	892	29	0,966	0,78	+I	Б	ФСТ
4	30	10	21	892	29	0,966	0,78	+I	Б	ФСТ
5	30	10	30	833	29	0,966	0,78	+I	Б	ФСТ
6	30	10	30	880	23,2	0,966	0,78	+I	Б	ФСТ
7	30	10	30	880	28	0,920	0,78	+I	Б	ФСТ

продолжение таблицы 1

8	30	10	30	880	28	0,920	0,250	+I	Б	ФСТ
9	30	10	30	880	28	0,960	0,75	-I	Б	ФСТ
10	30	10	30	880	28	0,960	0,75	0	М	ФСТ
11	30	10	30	880	28	0,960	0,75	0	М	Фотосет.
12	30	10	30	880	28	0,960	1,34	0	М	Фотосет.
13	30	10	30	880	28	0,960	0,95	0	М	ФСТ
14	30	10	30	880	28	0,960	1,0	0	Б	ФСТ
15	30	10	30	880	28	0,980	0,97	-I	Б	ФСТ
16	30	20,3	25,4	866	27	0,970	1,0	-I	Б	ФСТ
17	30	13,8	28,7	875	28	0,980	0,42	0	Б	ФСТ

В каждой серии опытов изготавливали по 10 образцов резистивных элементов, каждая серия повторялась три раза. Для усреднения влияния неконтролируемых и неучтенных факторов порядов постановки опытов был рандомизирован [8].

Экспериментальные данные по средним значениям сопротивления образцов в каждом повторном опыте и общее среднее по всей серии а также среднеквадратичное отклонение представлены в таблице 2

Таблица 2 – средние значения сопротивления и среднеквадратичное отклонение

№ опыта	$R1$, кОм	$R2$, кОм	$R3$, кОм	Rср, кОм	$\delta 1$	$\delta 2$	$\delta 3$	δср
I	2,1952	2,3024	2,4727	2,3324	0,0287	0,0175	0,0205	0,0808
2	2,7680	2,3616	2,2095	2,4464	0,0447	0,0600	0,0466	0,0621
3	2,2514	2,0080	2,3655	2,2083	0,0259	0,0313	0,0354	0,1054
4	2,2738	2,5261	2,5430	2,4476	0,0260	0,0178	0,0482	0,0871
5	0,9673	0,8957	0,8918	0,9183	0,0109	0,0075	0,0079	0,0192
6	1,7824	1,8606	1,9788	1,8739	0,0170	0,0251	0,0183	0,0571
7	1,8876	1,6141	2,2445	1,9154	0,0093	0,0336	0,0117	0,1825
8	1,4549	2,2679	1,7044	1,8091	0,0185	0,0275	0,0201	0,2327
9	2,0756	2,0966	2,1337	2,1020	0,0602	0,0171	0,0346	0,1128
10	1,8176	2,4908	1,9604	2,0896	0,0617	0,0573	0,0128	0,1907
11	1,9953	1,6724	2,4103	2,0260	0,0532	0,0233	0,0228	0,2134
12	1,1270	1,0939	0,8393	1,0201	0,0143	0,0203	0,0212	0,0909
13	1,0423	1,0062	1,0333	1,0273	0,0311	0,0293	0,0328	0,0108
14	1,0257	1,0771	1,0266	1,0431	0,0129	0,0276	0,0349	0,0170
15	1,4700	1,0012	1,1922	1,135	0,0491	0,0085	0,0109	0,0576
16	1,0659	1,0249	1,0855	1,0588	0,0166	0,0094	0,0053	0,0176

продолжение таблицы 2

17	0,8689	1,0587	1,2020	1,0432	0,0272	0,0735	0,0114	0,0965

Из полученных результатов отбрасывался наихудший (№6) и рассчитывались условия проведения следующего опыта (№12). После его осуществления из оставшихся опытов (№1-7, 9-12) снова был выбран опыт с наихудшим результатов (№11) и рассчитаны координаты точек в опыте №13.

Из таблицы 2 видно, что после 17 опытов улучшения результата не наблюдалось. Это означает, что опыты подошли к «почти стационарной части» с большой кривизной поверхности. Таким образом, проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о возможном управлении попаданием в заданный номинал с тем или иным допуском.

Для определения факторов, в наибольшей степени влияющих на разброс сопротивления, необходимо было провести проверку всех исследуемых факторов на значимость и отбросить все незначимые факторы.

Проверка на значимость проводилась по общепринятой методике следующим образом.

Строилась математическая модель процесса в виде (формула 2)

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_k x_k, \quad (2)$$

где x_i – кодированное значение i-го фактора, k – количество факторов.

При этом учитываются лучшие опыты (№1,2 4-6, 9, 12-16)

Затем по формулам 3-6 определялись коэффициенты уравнения формулы 1, дисперсии S_{bi}^2 и критерий Стьюдента t_{bi} для каждого из них.

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^{K+1} y_j}{k+1}, \quad (3)$$

где y_j – значение отклика (отклонения) в j-м опыте, k+1 – количество опытов

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{j=1}^{N} x_{ij}}, \quad (4)$$

где i = 0, 1, 2, … 10.

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N} S_j^2}{N}, \quad (5)$$

$$S_j^2 = \frac{\sum_{2}^{nj} (y_j - y)^2}{n_j(n_j - 1)}, \quad (6)$$

где n_j – количество повторных наблюдей в j-ом опыте, y – среднее значение отлика в j-ом опыте

Расчет критериев B_i, S_{Bi}^2, t_{bi} производится по формуле 7

$$t_{Bi} \frac{B_i}{S_{Bi}}, \quad (7)$$

Полученные значения представлены в таблице 3

Таблица 3 – значения B_i, S_{Bi}^2, t_{bi}

B_i	S_{Bi}^2	t_{bi}
0,0470	0,0003	2,72
0,0127	0,0028	0,24
0,1057	0,0273	3,9
-0,005	0,073	0,1
0,0176	0,0028	0,3
0,0997	0,0075	3,6
0,0465	0,0013	2,49
0,0896	0,0017	2,27
0,0900	0,0200	1,8
0,0890	0,0018	2,09

продолжение таблицы 3

0,0890	0,0018	2,09

При сравнении полученных значений t – критерия с табличным (t=2,07 для 5-ти процентного уровня значимости) приходим к выводу, что из всех факторов наиболее значимым являются X_2, X_7, X_{10}, т.е время выдержки образцов при пиковой температуре обжига, величина зазора между трафаретом и кассетой и тип фотоэмульсии на трафарете.

Таким образом, на основания проведенного эксперимента с целью снижения разброса величины сопротивления можно рекомендовать следующие технологические режимы:

– применять трафарет с фотоэмульсией ФСТ;

– устанавливать зазор между трафаретом и кассетой порядка 0,9-1 мм;

– увеличить время выдержки при пиковой температуре до 10 мин.

Если при постановке задачи за функцию отклика принять значение сопротивления, т.е попытаться выявить факторы, определяющие его абсолютное значение, то расчет полученных экспериментальных данных, аналогичный вышеприведенному, показывает определяющее влияние тех же факторов с добавлением еще одного значимого фактора – толщина подложки (таблица 4)

Таблица 4 – значения t – критерия (за функцию отклика принята величина R)

t_{b0}	t_{b1}	t_{b2}	t_{b3}	t_{b4}	t_{b5}	t_{b6}	t_{b7}	t_{b8}	t_{b9}	t_{b10}
4,30	-0,07	3,70	0,20	-0,22	-0,50	2,70	2,45	-0,24	1,90	2,01

На основании последнего можно утверждать, что определяющим фактором для разброса величины сопротивления будет также еще один фактор – толщина керамической подложки. Тот факт, что значимость этого фактора не выявилась, когда за функцию отклика была принята величина сопротивления, объясняется самой постановкой разброса эксперимента: каждая серия опытов выполнялась на подложках одинаковой тощины.

3.3 Исследование свойств паст на основе соединений рутения

Рутениты, состав которых можно представить в виде $Me_2Ru_2O_{6-7}$, где Me – дву-или трехвалентный металл, сравнительно недавно стали объектом исследований, свойства их еще недостаточно изучены. Этот класс сложных окислов рутения уже нашел довольное широкое применение в качестве основного материала в производстве керметных паст, как за рубежом так и на наших предприятиях.

Основу пасты составляет тонко измельчённый активный компонент – чаще всего это RuO_2 или его гидратированные формы, иногда также комплексные соединения рутения с органическими лигандами, способные придавать материалу дополнительные функциональные свойства. Рутений, как элемент платиновой группы, проявляет уникальную способность к устойчивому существованию в различных степенях окисления, что делает его соединения весьма перспективными для применения в условиях, требующих высокой химической инертности и долговечности.

Паста представляет собой суспензию, в которой активные частицы рутения равномерно распределены в органическом или неорганическом носителе. В качестве дисперсионной среды традиционно используются органические растворители, нередко в сочетании с полимерными связующими компонентами, обеспечивающими необходимую вязкость, тиксотропию и возможность равномерного нанесения пасты на подложку. Одновременно в состав пасты вводятся различные стеклообразующие добавки, например, на

основе свинцового или боросиликатного стекла, которые при термообработке формируют аморфную матрицу, прочно фиксирующую активные частицы на поверхности [9].

Технология получения таких паст может варьироваться от простого механического смешивания порошков с органическими смесями до более сложных золь-гель процессов или коллоидно-химических методов, обеспечивающих тонкую настройку размера, формы и распределения частиц рутения. После нанесения на подложку (чаще всего керамическую или стеклянную) паста подвергается высокотемпературной термообработке, в ходе которой происходит выгорание органических компонентов, спекание частиц и формирование прочной проводящей структуры.

Свойства полученного материала тщательно исследуются на всех этапах – от микро- и наноструктуры до электрических, механических и термических характеристик. Особое внимание уделяется измерению удельного сопротивления, температурного коэффициента сопротивления, стабильности проводящих характеристик при циклическом нагреве, а также сопротивлению старению и коррозии. Анализ структуры и морфологии проводится с помощью современных методов микроскопии и рентгеноструктурного анализа, что позволяет детально изучить взаиморасположение и взаимодействие фаз, возникающих в процессе термообработки.

Немаловажную роль играют термические свойства паст, поскольку от них зависит поведение материала в условиях эксплуатации. С помощью термогравиметрического анализа и дифференциального термического анализа оценивается термостойкость пасты, температура начала выгорания связующих компонентов и стадия формирования керамической матрицы.

Помимо электроники, где такие пасты используются для производства стабильных толстоплёночных резисторов, они находят применение и в других

сферах. В частности, благодаря высокой каталитической активности соединений рутения, пасты на их основе используются в качестве катализаторов в реакциях окисления органических веществ, а также в качестве рабочих электродных материалов для электрохимических датчиков, особенно тех, которые функционируют в агрессивных или биологически активных средах. Здесь особенно ценится возможность точной настройки потенциала электродов и устойчивости к загрязнению поверхности [10].

Для исследования были выбраны рутениты свинца и висмута с модифицирующими добавками в сочетании со стеклами различных марок (279, *Ru*-34, *E*-1410, 302-6). Были опробованы также двухкомпонентные стекла.

Результаты измерений удельного сопротивления и ТКС резистивных пленок приведены в таблице 5

Таблица 5 – Значения удельного сопротивления и ТКС резистивных паст на основе рутенитов и двухкомпонентных стекол

№ п/п	Обозначение порошка	Обозначение стекла	Содержание проводящей фазы, %	ρ_s, кОм/м	ТКС · 10^{-6} 1/°С
1	2с	№ 3	30	50	+50
-	-	-	40	2	+300
-	-	-	50	0,6	+400
2	2с	№ 1	40	20	-120
3	14с	№ 1	40	15	+100
4	14с	№ 2	40	15	-10

В таблице приведены результаты испытания композиций на стеклах 279, *Ru*-34 а также двухкомпонентного. Данные для паст со стеклами *E*-1410 и 302-6

не приводятся, так как эти пасты со своими электрофизическими характеристиками достаточно близки к паста на стекле *Ru*-34.

Как показали результаты исследований, электрические параметры паст на основе рутенитов в значительной мере определяются составом стекла. Так, при изменении содержания проводящей фазы в резистивной композиции от 60% до 40% для композиций со стеклом 279 удельное сопротивление изменялось от 2 кОм/м до 550 кОм/м, тогда как у паст на основе стекла *Ru*-34 не превышало 1-2 кОм/м.

Большое различие можно наблюдать также и по величине ТКС. Композиции на стекле Ru-34 показывают величину ТКС на 300-500 единиц выше. Использование дкухкомпонентых стекол в пастах на основе рутенитов свинца значительно снижает ТКС высоомных систем.

Влияние стекла также проявляется и на характере воздействия модифицирующей добавки на электрические параметры паст на основе рутенитов.

Также проводилось исследование температурной зависимости сопротивления, она изучалась в широком интервале температур от -175°С (98 К) до +155 °С (428К). Снимались кривые зависимости для проводящей системы на основе двуокиси рутения.

На рисунке 14-17 приведены зависимости $\frac{\Delta R}{R} = f(T)$ для систем RuO_2, $RuO_2 + Nb_2O_5$ со стеклом 279 с содержанием проводящей фазы 40, 43, 45, 50%. Процент легирования варьировался для разных композиций от 1 до 25%.

Хорошо видно закономерное изменение температурной зависимости величины сопротивления по мере увеличения количества в проводящей фазе, а именно: угол наклона кривых уменьшается и для 10% содержания Nb_2O_5 при низких температурах переходит из положительного в отрицательный [11].

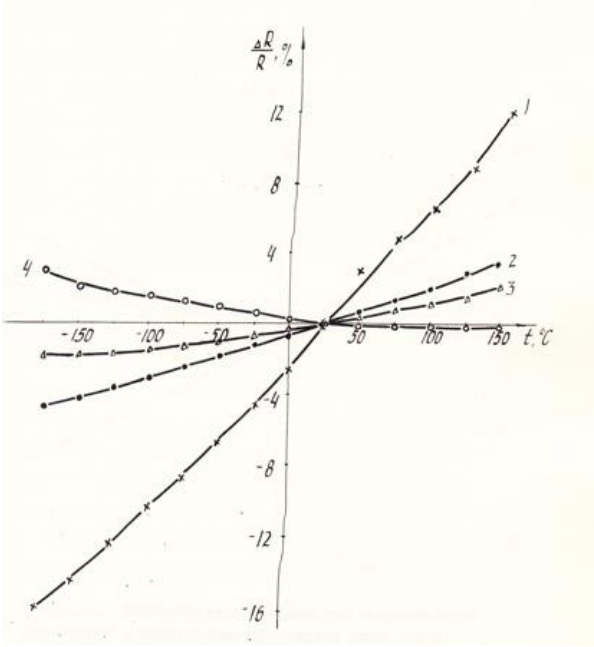

Рисунок 14 – Температурная зависимость сопротивления композиций с содержанием проводящей фазы 40%: 1 – RuO_2; 2 – $RuO_2 + 1\%\ Nb_2O_5$; 3 – $RuO_2 + 5\%\ Nb_2O_5$; 4 – $RuO_2 + 10\%\ Nb_2O_5$.

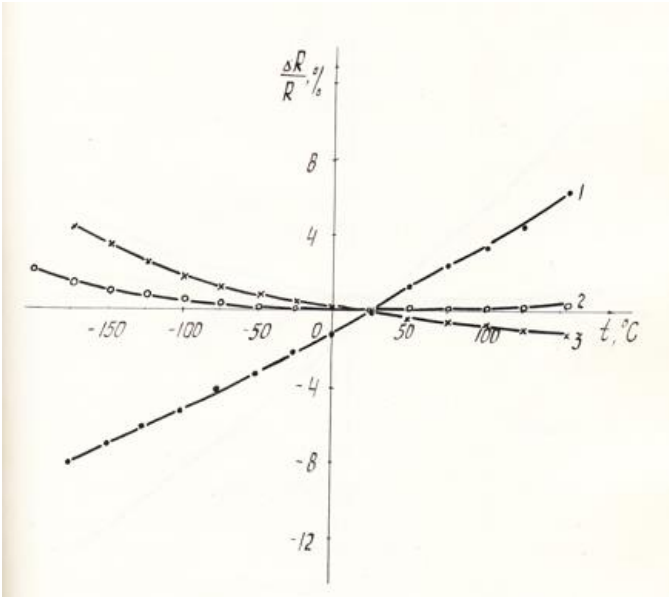

Рисунок 15 – Температурная зависимость сопротивления композиций с содержание проводящей фазы 43%: 1 – $RuO_2 + 1\%\ Nb_2O_5$; 2 – $RuO_2 + 10\%\ Nb_2O_5$; 3 – $RuO_2 + 25\ \%\ Nb_2O_5$.

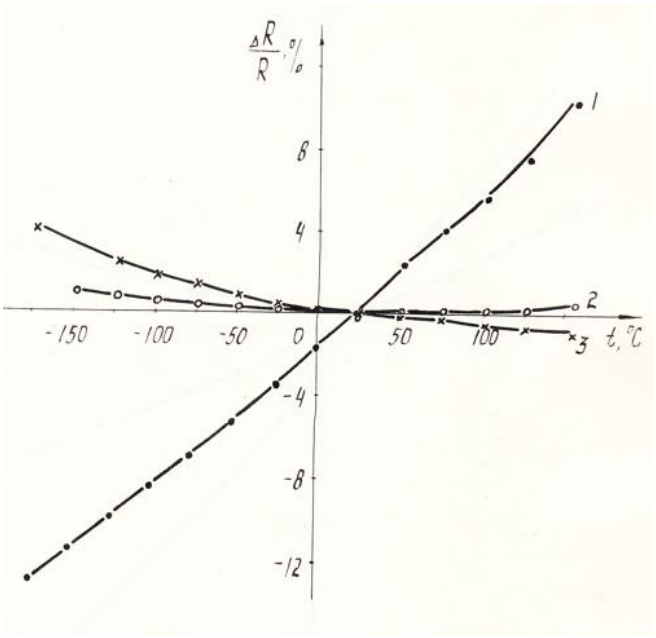

Рисунок 16 – Температурная зависимость сопротивления композиций с содержание проводящей фазы 45%: 1 – $RuO_2 + 1\%\ Nb_2O_5$; 2 – $RuO_2 + 10\%\ Nb_2O_5$; 3 – $RuO_2 + 25\ \%\ Nb_2O_5$.

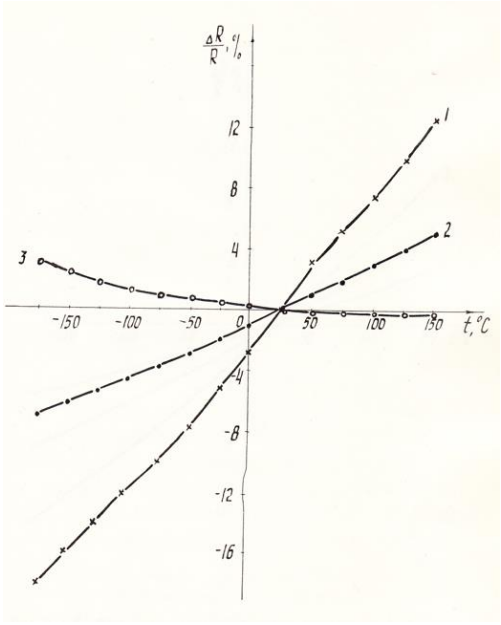

Рисунок 17 – Температурная зависимость сопротивления композиций с содержанием проводящей фазы 50%: 1 – RuO_2; 2 – $RuO_2 + 5\%\ Nb_2O_5$; 3 – $RuO_2 + 25\%\ Nb_2O_5$

4 Управление освещением

Управление наружным освещением должно выполняться независимым от управления внутренним освещением. В городах и населенных пунктах, на промышленных предприятиях должно предусматриваться централизованное управление наружным освещением. Централизованное управление рекомендуется также для общего освещения больших производственных помещений (площадью несколько тысяч квадратных метров) и некоторых помещений общественных зданий. Способы и технические средства для систем централизованного управления наружным и внутренним освещением должны определяться технико-экономическими обоснованиями.

4.1 Управление внутренним освещением

При питании освещения зданий от подстанций и сетей, расположенных вне этих зданий, на каждом вводном устройстве в здание должен устанавливаться аппарат управления. При питании от одной линии четырех и более групповых щитков с числом групп 6 и более на вводе в каждый щиток рекомендуется устанавливать аппарат управления. В помещениях, имеющих зоны с разными условиями естественного освещения и различными режимами работы, должно предусматриваться раздельное управление освещением зон. Выключатели светильников, устанавливаемых в помещениях с неблагоприятными условиями среды, рекомендуется выносить в смежные помещения с лучшими условиями среды. Выключатели светильников душевых и раздевалок при них, горячих цехов столовых должны устанавливаться вне этих помещений. В протяженных помещениях с несколькими входами, посещаемых обслуживающим персоналом (например кабельные, теплофикационные, водопроводные тоннели), рекомендуется предусматривать управление освещением от каждого входа или части входов. В помещениях с четырьмя и более светильниками рабочего освещения, не имеющих освещения безопасности и эвакуационного освещения, светильники рекомендуется распределять не менее чем на две самостоятельно управляемые группы. Управление освещением безопасности и эвакуационным освещением можно

производить: непосредственно из помещения; с групповых щитков; с распределительных пунктов; с вводных распределительных устройств; с распределительных устройств подстанций; централизованно из пунктов управления освещением с использованием системы централизованного управления, при этом аппараты управления должны быть доступны только обслуживающему персоналу. Управление установками искусственного ультрафиолетового облучения длительного действия должно предусматриваться независимым от управления общим освещением помещений. Светильники местного освещения должны управляться индивидуальными выключателями, являющимися конструктивной частью светильника или располагаемыми в стационарной части электропроводки. При напряжении до 50 В для управления светильниками допускается использовать штепсельные розетки.

4.2 Управление наружным освещением

Система управления наружным освещением должна обеспечивать его отключение в течение не более 3 мин. Управление наружным освещением рекомендуется осуществлять из ограниченного числа мест. Для небольших промышленных предприятий и населенных пунктов допускается предусматривать управление наружным освещением коммутационными аппаратами, установленными на линиях питания освещения, при условии доступа обслуживающего персонала к этим аппаратам. При централизованном управлении наружным освещением промышленных предприятий должна обеспечиваться возможность местного управления освещением. Управление освещением открытых технологических установок, открытых складов и других открытых объектов при производственных зданиях, освещение которых питается от сетей внутреннего освещения, рекомендуется производить из этих зданий или централизованно.Управление световым ограждением высотных сооружений (мачты, дымовые трубы и т.п.) рекомендуется предусматривать из объектов, к которым эти сооружения относятся. Централизованное управление

сетями наружного освещения городов, населенных пунктов и промышленных предприятий должно осуществляться путем использования коммутационных аппаратов, устанавливаемых в пунктах питания наружного освещения.Управление коммутационными аппаратами в сетях наружного освещения городов и населенных пунктов рекомендуется производить, как правило, путем каскадного (последовательного) их включения.В воздушно-кабельных сетях допускается включение в один каскад до 10 пунктов питания, а в кабельных - до 15 пунктов питания сети уличного освещения.

4.3 Осветительные приборы и электроустановочные устройства

Осветительные приборы должны устанавливаться так, чтобы они были доступны для их монтажа и безопасного обслуживания с использованием при необходимости инвентарных технических средств. В производственных помещениях, оборудованных мостовыми кранами, участвующими в непрерывном производственном процессе, а также в бескрановых пролетах, в которых доступ к светильникам с помощью напольных и других передвижных средств невозможен или затруднен, установка светильников и другого оборудования и прокладка электрических сетей могут производиться на специальных стационарных мостиках, выполненных из негорючих материалов. Ширина мостиков должна быть не менее 0,6 м, они должны иметь ограждения высотой не менее 1 м. В общественных зданиях допускается сооружение таких мостиков при отсутствии возможности использования других средств и способов доступа к светильникам. Светильники, обслуживаемые со стремянок или приставных лестниц, должны устанавливаться на высоте не более 5 м (до низа светильника) над уровнем пола. При этом расположение светильников над крупным оборудованием, приямками и в других местах, где невозможна установка лестниц или стремянок, не допускается. Светильники, применяемые в установках, подверженных вибрациям и сотрясениям, должны иметь конструкцию, не допускающую самоотвинчивания ламп или их выпадения. Допускается установка светильников с применением амортизирующих

устройств. Для подвесных светильников общего освещения рекомендуется иметь свесы длиной не более 1,5 м. При большей длине свеса должны приниматься меры по ограничению раскачивания светильников под воздействием потоков воздуха. Во взрывоопасных зонах все стационарно установленные осветительные приборы должны быть жестко укреплены для исключения раскачивания.

Для обеспечения возможности обслуживания осветительных приборов допускается их установка на поворотных устройствах при условии их жесткого крепления к этим устройствам и подводки питания гибким кабелем с медными жилами. Для освещения транспортных тоннелей в городах и на автомобильных дорогах рекомендуется применять светильники со степенью защиты IP65. Светильники местного освещения должны быть укреплены жестко или так, чтобы после перемещения они устойчиво сохраняли свое положение. Приспособления для подвешивания светильников должны выдерживать в течение 10 мин без повреждения и остаточных деформаций приложенную к ним нагрузку, равную пятикратной массе светильника, а для сложных многоламповых люстр массой 25 кг и более - нагрузку, равную двукратной массе люстры плюс 80 кг. У стационарно установленных светильников винтовые токоведущие гильзы патронов для ламп с винтовыми цоколями в сетях с заземленной нейтралью должны быть присоединены к нулевому рабочему проводнику. Если патрон имеет нетоковедущую винтовую гильзу, нулевой рабочий проводник должен присоединяться к контакту патрона, с которым соединяется винтовой цоколь лампы. В магазинных витринах допускается применение патронов с лампами накаливания мощностью не более 100 Вт при условии установки их на негорючих основаниях. Допускается установка патронов на горючих, например деревянных, основаниях, обшитых листовой сталью по асбесту.Провода должны вводиться в осветительную арматуру таким образом, чтобы в месте ввода они не подвергались механическим повреждениям, а контакты патронов были разгружены от

механических усилий. Соединение проводов внутри кронштейнов, подвесов или труб, при помощи которых устанавливается осветительная арматура, не допускается. Соединения проводов следует выполнять в местах, доступных для контроля, например в основаниях кронштейнов, в местах ввода проводов в светильники. Осветительную арматуру допускается подвешивать на питающих проводах, если они предназначены для этой цели и изготовляются по специальным техническим условиям. Осветительная арматура общего освещения, имеющая клеммные зажимы для присоединения питающих проводников, должна допускать подсоединение проводов и кабелей как с медными, так и алюминиевыми жилами. Для осветительной арматуры, не имеющей клеммных зажимов, когда вводимые в арматуру проводники непосредственно присоединяются к контактным зажимам ламповых патронов, должны применяться провода или кабели с медными жилами сечением не менее 0,5 мм^2 внутри зданий и 1 мм^2 вне зданий. При этом в арматуре для ламп накаливания мощностью 100 Вт и выше, ламп ДРЛ, ДРИ, ДРИЗ, ДНаТ должны применяться провода с изоляцией, допускающей температуру их нагрева не менее 100 °С. Вводимые в свободно подвешиваемые светильники незащищенные провода должны иметь медные жилы.

Ответвления от распределительных сетей к светильникам наружного освещения должны выполняться гибкими проводами с медными жилами сечением не менее 1,5 мм^2 для подвесных светильников и не менее 1 мм^2 для консольных. Ответвления от воздушных линий рекомендуется выполнять с использованием специальных переходных ответвительных зажимов. Для присоединения к сети настольных, переносных и ручных светильников, а также подвешиваемых на проводах светильников местного освещения должны применяться шнуры и провода с гибкими медными жилами сечением не менее 0,75 мм^2. Для зарядки стационарных светильников местного освещения должны применяться гибкие провода с медными жилами сечением не менее 1 мм^2 для подвижных конструкций и не менее 0,5 мм^2 для неподвижных. Изоляция

проводов должна соответствовать номинальному напряжению сети. Зарядка кронштейнов осветительной арматуры местного освещения должна соответствовать следующим требованиям:

– провода необходимо заводить внутрь кронштейна или защищать иным путем от механических повреждений; при напряжении не выше 50 В это требование не является обязательным;

– при наличии шарниров провода внутри шарнирных частей не должны подвергаться натяжению или перетиранию;

– отверстия для проводов в кронштейнах должны иметь диаметр не менее 8 мм с допуском местных сужений до 6 мм; в местах вводов проводов должны применяться изолирующие втулки;

– в подвижных конструкциях осветительной арматуры должна быть исключена возможность самопроизвольного перемещения или раскачивания арматуры.

Присоединение прожекторов к сети должно выполняться гибким кабелем с медными жилами сечением не менее 1 мм^2 длиной не менее 1,5 м. Защитное заземление прожекторов должно выполняться отдельной жилой.

Электроустановочные устройства

Устройства, устанавливаемые скрыто, должны быть заключены в коробки, специальные кожухи или размещаться в отверстиях железобетонных панелей, образованных при изготовлении панелей на заводах стройиндустрии. Применение горючих материалов для изготовления крышек, закрывающих отверстия в панелях, не допускается.

Штепсельные розетки для переносных электроприемников с частями, подлежащими защитному заземлению, должны быть снабжены защитным контактом для присоединения РЕ проводника. При этом конструкция розетки

должна исключать возможность использования токоведущих контактов в качестве контактов, предназначенных для защитного заземления. Соединение между заземляющими контактами вилки и розетки должно устанавливаться до того, как войдут в соприкосновение токоведущие контакты; порядок отключения должен быть обратным. Заземляющие контакты штепсельных розеток и вилок должны быть электрически соединены с их корпусами, если они выполнены из токопроводящих материалов. Вилки штепсельных соединителей должны быть выполнены таким образом, чтобы их нельзя было включать в розетки сети с более высоким номинальным напряжением, чем номинальное напряжение вилки. Конструкция розеток и вилок не должна допускать включения в розетку только одного полюса двухполюсной вилки, а также одного или двух полюсов трехполюсной вилки. Конструкция вилок штепсельных соединителей должна исключать натяжение или излом присоединяемых к ним проводов в местах присоединения. Выключатели и переключатели переносных электроприемников должны, как правило, устанавливаться на самих электроприемниках или в электропроводке, проложенной неподвижно. На подвижных проводах допускается устанавливать выключатели только специальной конструкции, предназначенные для этой цели. В трех- или двухпроводных однофазных линиях сетей с заземленной нейтралью могут использоваться однополюсные выключатели, которые должны устанавливаться в цепи фазного провода, или двухполюсные, при этом должна исключаться возможность отключения одного нулевого рабочего проводника без отключения фазного. В трех- или двухпроводных групповых линиях сетей с изолированной нейтралью или без изолированной нейтрали при напряжении выше 50 В, а также в трех- или двухпроводных двухфазных групповых линиях в сети 220/127 В с заземленной нейтралью в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных должны устанавливаться двухполюсные выключатели. Штепсельные розетки должны устанавливаться:

– в производственных помещениях, как правило, на высоте 0,8-1 м; при подводе проводов сверху допускается установка на высоте до 1,5 м;

– в административно-конторских, лабораторных, жилых и других помещениях на высоте, удобной для присоединения к ним электрических приборов, в зависимости от назначения помещений и оформления интерьера, но не выше 1 м. Допускается установка штепсельных розеток в специально приспособленных для этого плинтусах, выполненных из негорючих материалов [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В завершение исследования по повышению качества технологии изготовления керметных резисторов можно отметить значительный прогресс в области материалов и производственных процессов. Внедрение новых методов синтеза и улучшение параметров технологических этапов позволяют достичь более высокой точности, стабильности и надежности резисторов.

Обнаруженные улучшения в микроструктуре материалов, использование передовых методов контроля качества и оптимизация процессов обжига способствуют повышению эффективности производства. Это не только улучшает характеристики конечных изделий, но также содействует сокращению отклонений в производственном процессе. Однако, несмотря на достигнутые результаты, следует продолжать исследования в этой области с целью дальнейшего совершенствования технологии. Перспективы внедрения новых материалов, оптимизация процессов формирования и постобработки могут привести к созданию еще более надежных и высокопроизводительных керметных резисторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Красов В. Пасты в микроэлектронике. -М. ; ЦНИИ «Электроника», 1976.
2. *Forlani F. and Prusenziati M. Electrocomponent Sciense and Technology,* 1976, v.3, pp 77-83.
3. *Pike G.E. and Seager C.H. Journal of appcied physics*, 1977, v.48, №12, pp 5162-5169
4. Воробьёва Г.В, Кошелев И.Л., Пушкина Г.Н. Влияние структуры керамики на воспроизводимость параметров толстоплёночных резисторов – ЭП, 1960, вып 8, с. 82-83.
5. Недорезов В.Г. «Механизм старения керметных резистивных материалов» Материаловедение, 2002, №5(62), с. 20-24.
6. Электроника: наука, технология, бизнес №6, 2011. «Современные композиционные керметные материалы для толстоплечноных резисторов»
7. Недорезов В.Г. «Создание керметных резистивных материалов с минимальным значением температурного коэффициента сопротивления» // Материаловедение, 2002, с. 23-26.
8. Аванесян Р.Р., Новорезов В.Г., Подшибякин С.В., Турдакин Н.С. «Связь технологических факторов формирования резистивного элемента с эксплуатационными характеристиками керметных резисторов» .. Электронная промышленность, 1985, вып. 8, с. 31-33.
9. Колдашов Н.Д. «Толстопленочные резисторы на основе соединений рутения» сер.3, 1978, вып. 5, с. 97-107.
10. *Pike G.E. and Seager C.H. Journal of applied Physics, 1977, v. 48, №12, pp. 5152-5169.*
11. *Kusy A. Thin Solid Films, 1976, v. 37. № 37, pp. 281-302.*
12. *http://www.electromontaj-proekt.ru/*

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Задание на выпускную квалификационную работу

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ»

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Презентация ВКР