

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГЕРКОНОВ МКА-40142

*В.В. Прадед, В.С. Соломенникова, к.т.н.,
В.В. Орешкин, к.т.н., Ю.К. Молчанов, к.т.н.
390005, Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1*

ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Представлены экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности повышения электрической прочности вакуумных герконов посредством высоковольтной и высокочастотной тренировки.

The experimental data testifying to possibility of electric durability increase of the vacuum reed switches by means of the high-voltage and high-frequency training are presented.

Введение

Обеспечение высокой (свыше 10 кВ) электропрочности вакуумных магнитоуправляемых контактов МКА-40142 является одной из основных проблем в их производстве [1, 2]. Вероятная причина недостаточной электропрочности отдельных образцов приборов – повышенное давление остаточных газов. Аналитическая оценка количества газов, выделяющихся из расплавленного стекла во время отпая, показывает, что этот процесс, действительно, может недопустимо повышать давление в приборах, отличающихся весьма малым (около 1 см³) объемом и отсутствием геттера. В герконах с достаточно низким давлением остаточных газов могут происходить вакуумные пробои.

В настоящей работе предложены и экспериментально опробованы способы повышения электрической прочности герконов после герметизации.

Высоковольтная тренировка при постоянном напряжении

В ходе высоковольтной тренировки происходит поглощение газов в ионизированном состоянии при возникновении импульсов газового разряда, и снижается эффективность действия инициаторов вакуумных пробоев на поверхности контакт-деталей. Однако одновременно с этим тренировка может вызывать разрушение поверхности электродов, что повышает склонность к свариванию при контакте электродов и вероятность их залипания. Задача заключается в оптимизации режима тренировки с целью повышения электрической прочности без разрушения контактного покрытия.

В производстве в ходе тренировки напряжение между контактами герконов плавно повышается до предельного значения 12 кВ и выдерживается в течение одной минуты. Можно предположить, что увеличение продолжительности тренировки должно усилить поглощение газа и, следовательно, повысить электрическую прочность.

Для экспериментальной проверки этого предположения отбирались герконы, прошедшие тренировку по стандартному режиму и отбракованные по пониженному пробивному напряжению (5 – 8 кВ при норме 12 кВ). Эти герконы (35 штук) подвергались дополнительной тренировке на высоковольтной установке с напряжением свыше 12 кВ. Напряжение на приборы подавалось через ограничительное сопротивление 5 МОм. Паразитная емкость высоковольтного кабеля составляла 170 пФ. Для ограничения тока разряда емкости непосредственно к геркону подключался резистор 100 кОм. Методика тренировки заключалась в ступенчатом (на 1 кВ) повышении напряжения до 12 кВ с выдержкой на каждой ступени до прекращения пробоев (но не более трех минут), регистрируемых по показаниям токового прибора. При этом длительность тренировки увеличивалась в зависимости от электрической прочности промежутка. Для уменьшения времени тренировки проводились эксперименты с наложением поперечного магнитного

поля. Однако при индукции до 0,2 Тл существенных преимуществ такого способа тренировки выявлено не было.

Приборы, прошедшие высоковольтную тренировку, испытывались по методике, соответствующей приемке изделий. Напряжение плавно повышалось до 12 кВ и выдерживалось в течение одной минуты. Приборы считались выдержавшими испытания, если в процессе выдержки не возникало ни одного пробоя. Результаты испытаний приборов на электрическую прочность до тренировки, после тренировки и после выдержки в течение одного месяца представлены на рис. 1 в виде гистограмм.

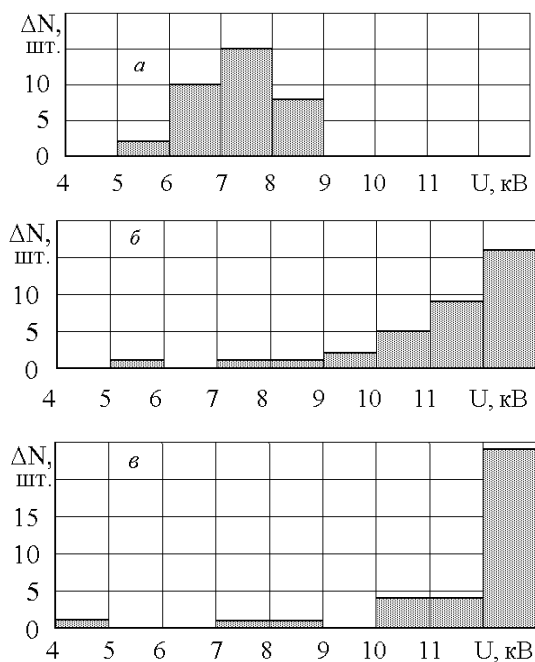


Рис. 1. Гистограммы распределения герконов по пробивному напряжению: *а* – до тренировки, *б* – после тренировки при постоянном напряжении, *в* – после выдержки (1 месяц). ΔN – количество герконов с напряжением пробоя в интервале 1 кВ. Общее количество $N = 35$

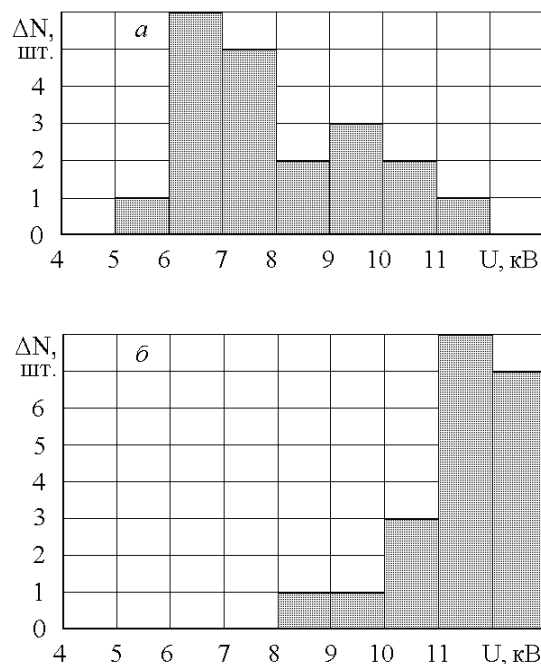


Рис. 2. Гистограммы распределения герконов по пробивному напряжению: *а* – до тренировки, *б* – после тренировки при высокочастотном напряжении (аппаратом «Тесла»). ΔN – количество герконов с напряжением пробоя в интервале 1 кВ. Общее количество $N = 20$

Как видно из рис. 1, максимум распределения в результате тренировки смещается в область более высоких значений пробивного напряжения, а 35 % приборов соответствуют требованиям по электрической прочности. Интересно, что после выдержки в течение месяца электрическая прочность, в целом, возросла (за исключением одного случая резкого уменьшения пробивного напряжения, предположительно связанного с натеканием). Повышение электрической прочности после выдержки свидетельствует о том, что поглощенные при тренировке остаточные газы не выделяются постепенно в объем прибора.

Помимо испытания на электрическую прочность у приборов, прошедших дополнительную высоковольтную тренировку на заводском оборудовании, по стандартной методике измерялись МДС срабатывания и отпускания, а также сопротивление в замкнутом состоянии контактов. Для подавляющего большинства герконов заметное изменение этих параметров после тренировки не обнаружилось. Однако в одном из герконов МДС отпускания уменьшилась ниже предельно допустимого значения, и возникали случаи залипания контактов, что связано, вероятно, с изменением состояния поверхности электродов.

В образцах герконов с малыми значениями МДС срабатывания и межконтактного зазора электрическая прочность может ограничиваться возникновением дребезга контактов в результате их электрического притяжения. Процесс возникает при напряжении свыше 9 кВ, сопровождается искрением промежутка, прекращается лишь при уменьшении напряжения до сравнительно малой (около 5 кВ) величины и вызывает интенсивное разрушение контактных покрытий. Для уменьшения времени дребезга при испытании герконов необходимо предусмотреть быстрое автоматическое отключение высокого напряжения. Проведенные эксперименты показали, что межконтактный зазор в готовых герконах при необходимости может быть увеличен локальным импульсным нагревом одной из контакт-деталей лучом лазера с помощью установки «Квант».

Таким образом, опробованный режим более длительной тренировки существенно повышает электропрочность, но при этом около 60 % приборов имеют пробивное напряжение меньше нормы 12 кВ. Появление одного прибора с пониженным значением МДС отпускания свидетельствует о возрастании риска разрушения поверхности электродов.

Тренировка высокочастотным разрядом

С целью повышения эффективности поглощения остаточных газов и уменьшения вероятности разрушения поверхности отрицательного электрода ионной бомбардировкой был опробован способ высоковольтной тренировки герконов высокочастотным разрядом со спектром частот в диапазоне 0,15 – 30 МГц, инициируемым с помощью аппарата «Тесла».

Эксперимент проводился с партией приборов, отбракованных в производстве по напряжению пробоя. При возбуждении высокочастотного разряда один из выводов геркона заземлялся, а выходной стержень аппарата «Тесла» располагался снаружи баллона геркона вблизи его середины (с небольшим смещением к незаземленному выводу). Расстояние до стекла подбиралось таким, чтобы по его поверхности не возникали искры. Разряд поддерживался в течение 1 минуты. В таких условиях в большинстве случаев наблюдалось объемное (вне перекрытия контактов) разрядное свечение, интенсивность которого с течением времени уменьшалась, что, вероятно, связано с уменьшением давления остаточных газов в результате их поглощения в ионизированном состоянии. Через 30 – 40 секунд наблюдались лишь редкие вспышки излучения.

Результаты испытаний на электрическую прочность герконов, прошедших тренировку высокочастотным разрядом, представлены на рис. 2, из которого следует, что пробивное напряжение для всех герконов существенно повысилось, а 35 % приборов выдержали испытание на электрическую прочность (отсутствие пробоев при напряжении 12 кВ в течение 1 минуты). Отметим, что высокочастотная тренировка не оказывает негативного влияния на состояние поверхности и, следовательно, на такие параметры, как МДС отпускания и переходное сопротивление, что подтвердили результаты испытаний.

Сопоставляя результаты двух вариантов тренировки, можно отметить следующее. Оба варианта, как первый, заключающийся в ступенчатом подъеме постоянного напряжения с увеличением длительности тренировки, так и второй, использующий обработку герконов в высокочастотном разряде, позволяют увеличить электропрочность герконов. Однако тренировка по первому варианту требует в несколько раз больших затрат времени, чем тренировка по второму варианту. Еще более важным преимуществом второго варианта тренировки является то, что высокочастотный разряд характеризуется образованием плазмы в сравнительно большом объеме вне зоны контактирования. Это повышает эффективность поглощения газов и уменьшает разрушение контактирующих поверхностей электродов.

Исследуя возможность повышения электрической прочности герконов путем поглощения остаточных газов в объеме, необходимо оценить вероятность выделения поглощенных газов с течением времени за счет десорбционных процессов. С этой целью проводились периодические испытания оттренированных приборов в процессе длительной выдержки, общая продолжительность которой составила более 6 месяцев. Как видно из

рис. 3, после выдержки в течение шести месяцев ухудшение электрической прочности не происходит.

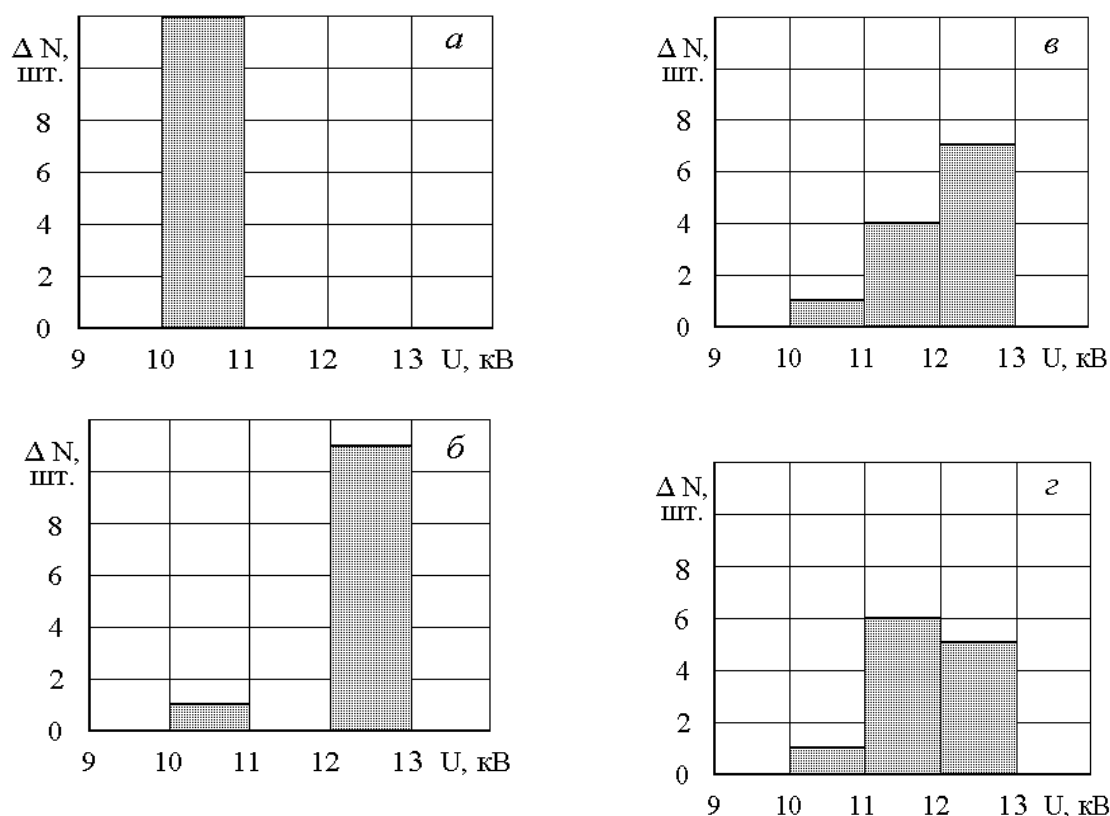


Рис. 3. Гистограммы распределения герконов по пробивному напряжению: *a* – до выдержки, *б*, *в*, *г* – после выдержки в течение 20, 100, и 200 суток; ΔN – количество герконов с пробивным напряжением в интервале 1 кВ. Общее количество герконов в партии $N = 12$

С той же целью проверки наличия или отсутствия десорбционных процессов производился прогрев оттренированных герконов в течение одного часа при температуре 180 °С. До и после прогрева проверялась электрическая прочность. На рис. 4 представлены результаты испытаний, которые свидетельствуют о том, что в целом снижения электропрочности после прогрева не произошло. Следовательно, поглощенные газы достаточно прочно связываются и удерживаются, в первую очередь, металлическими поверхностями. Это согласуется с данными авторов работы [3], в которой приводятся сведения о том, что в результате воздействия ВЧ плазмы пониженного давления на металлы и твердые сплавы атомы и ионы плазмообразующего газа проникают в поверхностные слои материала на глубину до 30 нм, образуя нанофазные системы из различных химических соединений.

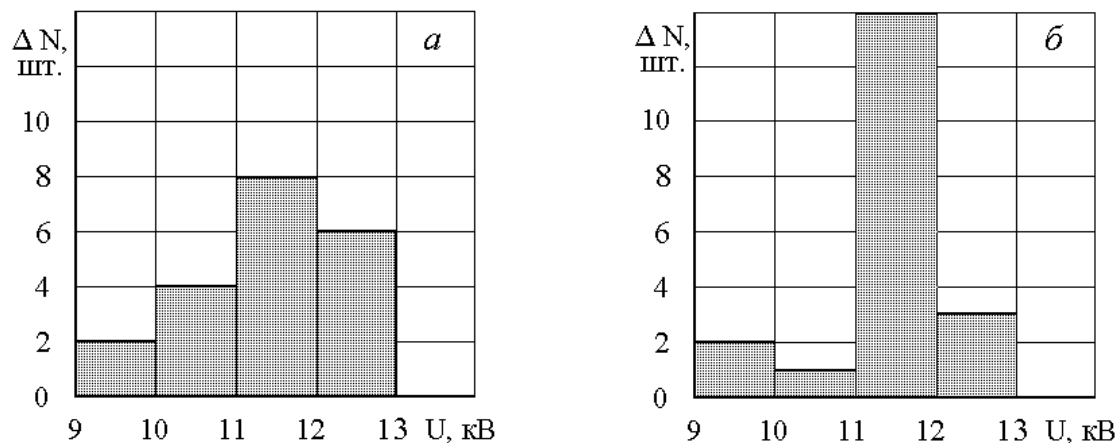


Рис. 4. Гистограммы распределения герконов по пробивному напряжению во второй партии: *а* – до прогрева, *б* – после прогрева. ΔN – количество герконов с пробивным напряжением в интервале 1 кВ, $N = 20$ – общее количество герконов

Таким образом, проведенные исследования показали эффективность применения высокочастотного разряда для тренировки вакуумных герконов. С помощью предложенного способа тренировки можно существенно повысить процент выхода годных изделий. Тренировку целесообразно проводить до первичных испытаний на электрическую прочность как предварительный этап, обеспечивающий эффективное поглощение газов и не оказывающий разрушающего воздействия на рабочие поверхности контакт-деталей.

Тренировка в автоколебательном режиме

В обследованном режиме тренировки контакты геркона в исходном состоянии были замкнуты постоянным магнитом и размыкались при подключении катушки к источнику напряжения через замкнутые контакты геркона. Ток катушки сравнительно медленно (≈ 1 мс) нарастал до критического значения, при котором магнитное поле тока компенсирует поле магнита. После размыкания контактов, в результате самоиндукции катушки на них достаточно быстро (микросекунды) и значительно (до 500 В) увеличивается напряжение. Когда ток индуктивности из-за потерь энергии уменьшится до величины, недостаточной для компенсации поля магнита, взаимное удаление контактов под действием упругих сил прекращается, начинается сближение контактов за счет магнита, и через некоторое время (микросекунды) контакты замыкаются. Ток индуктивности вновь возрастает до критического значения, и процессы повторяются.

По мере расхождения контактов пробой возникает при очень малом межэлектродном расстоянии и, соответственно, малом (сотни вольт) напряжении в сравнении с высоковольтной тренировкой. Поэтому следует ожидать, что автоколебательная тренировка будет меньше разрушать покрытие контакт-деталей. Однако уменьшение степени разрушения за один пробой не определяет однозначно более высокую эффективность автоколебательной тренировки, поскольку суммарное разрушение пропорционально также количеству пробоев за время тренировки, которое при высоковольтной тренировке может быть меньше. Проведенные исследования партии герконов показали, что тренировка герконов МКА-40142 в автоколебательном режиме приводит к повышению пробивного напряжения. Эффект проявляется сильнее с увеличением времени тренировки. Однако после такой тренировки в нескольких образцах приборов наблюдалось снижение МДС отпуская, и обнаружен случай залипания контактов.

Поглощение остаточных газов металлами

Проведены эксперименты по стимулированию поглощения остаточных газов в отпаянных герконах путем локального нагрева либо испарения материала контакт-деталей с помощью импульсного лазерного излучения на длине волны 1,04 мкм на установке «Квант 12». Излучение предварительно на пробном герконе фокусировалось через стеклянную оболочку приблизительно в центре контакт-детали. Энергия в импульсе подбиралась таким образом, чтобы после 1 – 3 импульсов на контакт-детали наблюдались следы локального (около 1 мм²) распыления металла. При этих экспериментах увеличение пробивного напряжения наблюдалось, но не у всех герконов. Проявился побочный эффект – изгиб контакт-деталей из-за локального нагрева. Степень изгиба зависит от энергии излучения в импульсе и от расположения точки локального нагрева (чем ближе к месту заварки, тем сильнее изгиб). Эффект может быть использован для регулировки зазора в отпаянных герконах.

Перспективным способом улучшения вакуума в герконах является использование в качестве геттера титанового покрытия контакт-деталей. Обоснованием для проведения экспериментов явилось то, что пробивное напряжение у приборов МКА-52141 и МКА-52142 с титановыми полосками внутри, изготовленных более 10 лет назад, выше, чем у аналогичных приборов без титановых полосок.

Было изготовлено несколько партий приборов по 5 штук в каждой. В одной группе имелись только титановые полоски на обеих контакт-деталях, в другой группе кроме полосок контакт-детали имели контактное покрытие из титановой фольги, приваренной контактной сваркой, в третьей – приборы имели только титановое контактное покрытие. Все приборы заваривались и откачивались на предприятии по стандартной технологии.

Проведенные эксперименты показали, что после высоковольтной тренировки пробивное напряжение наиболее заметно увеличивалось для приборов с полосками на электродах и титановым контактным покрытием. Способ может быть рекомендован для применения в производстве после разработки технологии нанесения Ti на контакт-детали.

Бесштенгельная герметизация приборов

С целью уменьшения количества газов, выделяющихся после герметизации из расплавленного стекла на этапе заварки, опробована бесштенгельная откачка приборов с применением для герметизации легкоплавкого стекла С73-2 с температурой плавления 430 – 450 °С и коэффициентом термического расширения (КТР), близким к КТР материала стеклянной оболочки герконов.

Предложен и опробован ряд способов герметизации: плавлением кусочка легкоплавкого стекла, помещенного в отверстие в вакуумной оболочке; пайкой металлической пластинки легкоплавким стеклом или ситаллоцементом; плавлением кусочка ситаллоцемента в поперечной прорези; плавлением кусочка хлористого серебра в круглом отверстии; плавлением просверленной капли легкоплавкого стекла.

Установлено, что наиболее технологичным для группового метода откачки является последний способ. На заготовку стеклянной трубки наносится капля замешанного с биндером порошка легкоплавкого стекла, которое затем расплавляется и обезгаживается под вакуумным колпаком при температуре 450 – 480 °С. После остывания заготовки извлекаются из-под колпака, и в центрах капель проделываются сквозные отверстия диаметром 0,5 – 1 мм (с помощью лазера или алмазного сверла). Далее по существующей технологии производится заварка герконов, приборы помещаются под колпак со специальным нагревателем, откачиваются и обезгаживаются в течение 1 часа при температуре 370 °С. Температура повышается до 440 – 450 °С и за 2–3 минуты происходит заплавление отверстия. В наших экспериментах откачка производилась форвакуумным насосом до давления 10⁻² Торр. Фотография приборов, изготовленных с применением различных способов герметизации легкоплавкими материалами, представлена на рис. 5.

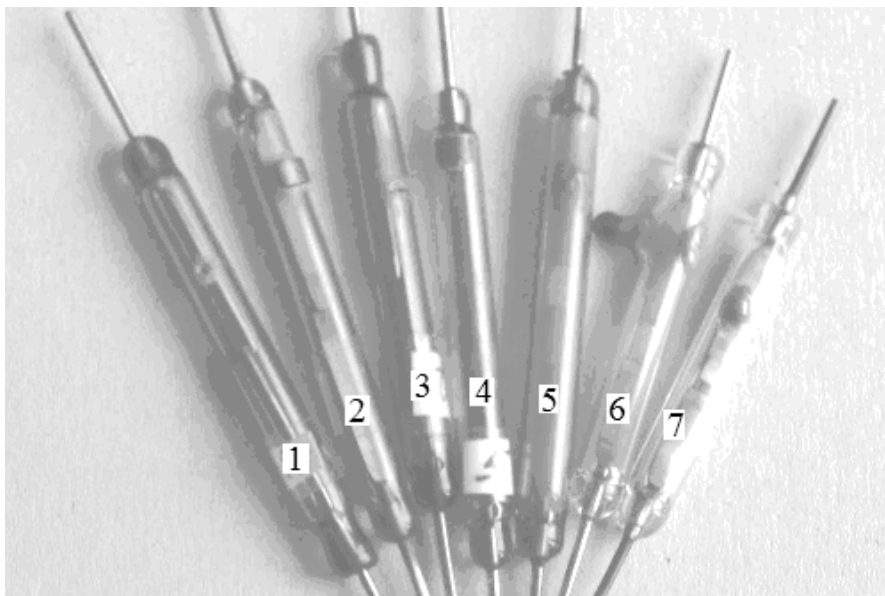


Рис. 5. Внешний вид герконов после бесштенгельной откачки с различными способами герметизации: 1 – плавлением кусочка легкоплавкого стекла; 2 – пайкой металлической пластинки ситаллоцементом; 3 – плавлением кусочка ситаллоцемента в поперечной прорези; 4 – пайкой металлической пластинки легкоплавким стеклом; 5 – плавлением кусочка хлористого серебра в круглом отверстии; 6 – плавлением просверленной капли легкоплавкого стекла; 7 – плавлением кусочка легкоплавкого стекла

Напряжение пробоя непосредственно после такой герметизации герконов составляло 5 – 6 кВ, но после тренировки возрастало до 9 – 12 кВ. При усовершенствовании режимов откачки и обезгаживания можно ожидать увеличения электропрочности бесштенгельных герконов. Отсутствие штенгеля улучшит эксплуатационные свойства герконов.

Выводы

1. Эффективным способом поглощения остаточных газов в герметизированных приборах и соответственного повышения пробивного напряжения (на 4 – 5 кВ) является возбуждение высокочастотного разряда с помощью аппарата «Тесла» в течение нескольких минут. Выделение поглощенных газов после 200 суток хранения или прогрева при 180 °С в течение 1 часа по результатам измерения пробивного напряжения не обнаружено.

2. Действенными, но менее эффективными являются и другие опробованные способы поглощения газов: возбуждение импульсных разрядов постоянного тока при ступенчатом увеличении напряжения в течение 5 – 10 минут; тренировка приборов в автоколебательном режиме с использованием постоянного магнита для замыкания контактов; локальное (около 1 мм²) испарение материала контакт-детали импульсным лазерным излучением на длине волны 1,04 мкм с помощью установки «Квант».

3. Перспективным способом улучшения вакуума в герконах является применение титана в качестве покрытия контактов или элементов конструкции. Опробование различных вариантов способа (с титановыми полосками, приваренными к контакт-детали вне зоны контактирования, и с контактным покрытием из титановой фольги, приваренной контактной сваркой) показало существенное увеличение пробивного напряжения после высоковольтной тренировки.

4. Снижение газовыделения на этапе заварки герконов обеспечивает бесштенгельная откачка с применением для герметизации легкоплавкого (440 °С) стекла С73-2.

Литература

1. Иваников А.С., Орешкин В.В., Скородумов В.Ф. Электрическая прочность вакуумных высоковольтных МК // Электронная техника, сер. 4, вып. 3, 1992. – С. 9 – 10.
2. Иваников А.С., Коротченко В.А., Орешкин В.В. Исследование факторов, определяющих электропрочность вакуумных высоковольтных магнитоуправляемых контактов // Сборник трудов 2-й Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 1–3 октября 2008 г. – Рязань: Изд. «Полиграф», 2009.
3. Абдулин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Юсупов О.Д. Высокочастотная плазма пониженного давления в процессах формирования нанослоев на поверхности конструкционных материалов // XXXIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 12–16 февраля 2007 г.