

УДК 537.523.3

УСТАНОВКА ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ПОИСКА СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ В ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ МЕТОДОМ КОРОННОГО РАЗРЯДА

Лавринович Валерий Александрович¹,
lavrhome@mail.ru

Меженский Алексей Анатольевич¹,
alexey.mezenskiy@gmail.com

Рахимов Рафаэль Самматович¹,
rafael555rakhimov@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность темы обусловлена необходимостью диагностики и профилактики состояния изоляции электрических машин горнодобывающей и нефтяной отрасли, в которых важны надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования. Диагностика скрытых дефектов позволяет прогнозировать остаточный ресурс работы электрической изоляции, планировать профилактические испытания и своевременные ремонты электротехнического оборудования высокого и низкого напряжений.

Цель исследования: разработка установки, позволяющей бесконтактно обнаруживать в тонких диэлектрических пленках различные дефекты, такие как сквозные отверстия, воздушные включения, проводящие включения, уменьшение толщины тонких диэлектрических покрытий, нанесенных на металлическое основание, которым могут быть электрические проводники с током, печатные платы.

Методы исследования. Для получения вольт-амперных характеристик исследуемого коронного разряда на исследуемый объект подавалось постоянное напряжение разной полярности, регистрировались ток через исследуемый промежуток в диапазоне 1...100 мкА с помощью микроамперметра типа М4204 и измерения высокого напряжения на исследуемом промежутке в диапазоне 1...15 кВ с помощью электростатического киловольтметра типа С196. Визуальная картина коронного разряда фиксировалась с помощью цифрового микроскопа типа «Микрон 800».

Результаты. Показана возможность обнаружения сквозных и скрытых дефектов размером порядка 10 мкм и более путем измерения тока коронного разряда в системе электродов острие–плоскость и визуальной картины коронного разряда. Приведены экспериментальные результаты применения коронного разряда с регулируемыми параметрами тока и напряжения для обнаружения скрытых дефектов в диэлектрических покрытиях, наносимых на токоведущие металлические основания, и тонких диэлектрических пленках, применяемых в качестве изоляции в современных электрических машинах большой и малой мощности. Особенностью установки является применение нелинейного элемента для ограничения тока короткого замыкания до значений, не вызывающих повреждения диэлектрического покрытия и коронного разряда регулируемых параметров по току и напряжению в качестве диагностирующего инструмента. Установка содержит регулируемый источник постоянного напряжения (0...30 кВ), нелинейный регулируемый ограничитель тока для предотвращения короткого замыкания в случае пробоя, регистратор тока короны, фото- и видео регистрацию оптических явлений коронирования.

Ключевые слова:

Коронный разряд, ток, дефект, тонкая пленка, лакокрасочное покрытие, высокое напряжение, нелинейный элемент.

Введение

Актуальность. Для эффективной работы горнодобывающей отрасли необходимо использовать надежное электротехническое оборудование. Производительность труда в горнодобывающей отрасли прямо пропорциональна электровооруженности. Горнодобывающая отрасль относится к числу энергоемких. Установленная мощность токоприемников большинства рудников превышает 20 МВт, что сравнимо с потребляемой мощностью крупных промышленных предприятий и средних по размерам населенных пунктов [1].

При высоком уровне электровооруженности в горной промышленности одним из важнейших эксплуатационных показателей электротехнического оборудования является их эксплуатационная надежность, так как она напрямую влияет на производительность и безопасность труда. Современное горное производство требует, чтобы оборудова-

ние работало бесперебойно в течение достаточно длительного, заранее заданного межремонтного периода. Для достижения поставленной цели необходимо полностью исключить причины, вызывающие поломки всех узлов и элементов сложного горнодобывающего комплекса, составной частью которого является электрооборудование. В электрической части машин элементом, отвечающим за срок службы оборудования и его надежность, является изоляция [2].

В связи с этим актуальна задача диагностики и профилактики состояния изоляции электрических машин горнодобывающей промышленности с целью своевременного выделения скрытых дефектов и прогнозирования их остаточного ресурса. Одним из методов обнаружения скрытых дефектов изоляции электрических машин может быть применение коронного разряда, позволяющего на ранней стадии без повреждения изоляции обнаружи-

вать, например, сквозные отверстия в тонкопленочной изоляции, широко используемой в электрических машинах [3].

Объект исследования. Корона как вид самостоятельного разряда известна более ста лет, тем не менее до настоящего времени к этому явлению обращаются и исследователи, и технологи [3–10]. Это явление представляет интерес не только с научной точки зрения, но и как инструмент для многих технологических целей, например для электрофильтров [5], электростатической окраски [6] и др. Одним из направлений использования коронного разряда может быть обнаружение скрытых дефектов в тонких пленках или лакокрасочных покрытиях металлических конструкций. Существуют установки, которые позволяют находить дефекты покрытия так называемым искровым методом, однако у них есть существенный недостаток – это искра, которая во многих случаях непустима и может вывести из строя, например, радиоэлектронную схему, покрытую тонким слоем защитного лака. Различные методы, которые пытаются применить в этой области, исключающие повреждение радиоэлектронной аппаратуры, не имеют достаточной разрешающей способности по месторасположению дефекта и ограничены по возможности обнаружения отверстий размером менее 0,3 мм [8, 9].

В источниках [8–11] приводятся данные о нахождении несплошности диэлектрических покрытий и их моделировании, нанесенных на металлическую подложку с помощью коронного разряда, переходящего в искровой разряд. Существенный недостаток описанного в [9–13] метода заключается в том, что коронирующий электрод соприкасается с диагностируемой диэлектрической поверхностью и в случае приближения к несплошности покрытия происходит искровой пробой между коронирующим электродом и заземленной металлической подложкой. Возникающий при этом ток разряда приводит к разрушению диэлектрического покрытия и вызывает эрозию металлической подложки.

Для отдельных видов оборудования, например для радиоэлектронной техники, такие воздействия могут приводить к выходу из строя элементов этого оборудования, поэтому в этой отрасли поиск дефектов в лаковых покрытиях не проводится. Например, дефектоскоп «Корона 2.2» [14] позволяет выявлять несплошности диэлектрических покрытий за счет искрового пробоя между электродом-щупом и металлической подложкой.

Таким образом, к недостаткам электроискрового метода можно отнести:

- 1) контакт щупа с поверхностью тестируемого диэлектрического покрытия;
- 2) регистрация дефекта по факту пробоя;
- 3) невозможность обнаружения латентных дефектов без разрушения покрытия;

4) напряжение на щупе от 20 кВ и выше;

5) большие токи в случае пробоя – от сотен микроампер до единиц миллиампер.

Использование искрового метода и установок, основанных на этом принципе, неприемлемо для тонких пленок и печатных плат, изоляционных покрытий обмоток двигателей и трансформаторов.

Дефекты, которые могут встречаться в тонких диэлектрических покрытиях, представлены на рис. 1. дефекты, за исключением первого, являются латентными, и их выявление представляется нетривиальной задачей.

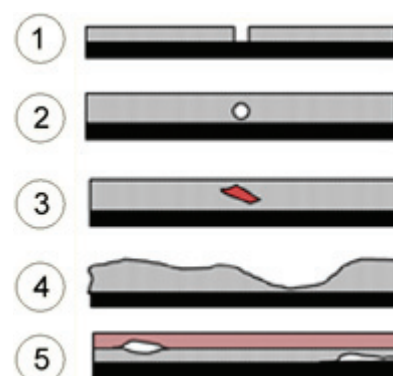


Рис. 1. Виды дефектов: 1 – сквозные дефекты; 2 – газовые включения; 3 – твердотельные включения инородных материалов, которыми могут быть диэлектрики с большим значением диэлектрической проницаемости, чем диэлектрическое покрытие, или металлические включения (например, металлическая стружка); 4 – зоны с уменьшенной толщиной покрытия; 5 – отслоение и расслоение

Fig. 1. Types of defects: 1 are the holes; 2 are the gas inclusions; 3 are the solid inclusions (dielectrics with high dielectric constant or metal inclusion); 4 are the thin dielectric zones; 5 are the layer separation and stratification

Применение коронного разряда в качестве диагностического инструмента, по нашему мнению, позволит исключить контакт щупа с диэлектрической поверхностью, искровой пробой, обнаружить латентные дефекты, снизить до единиц киловольт напряжение на электроде-щупе, а также токи, протекающие в цепи при диагностировании, до нескольких микроампер. Важно отметить, что диэлектрическое покрытие может выступать в качестве барьера при наличии латентных дефектов типа газовое включение и расслоение, это может быть использовано для разработки метода их обнаружения путем регистрации импульсного тока еще до появления чехла короны [15].

В связи с этим нами была поставлена задача: создать установку для бесконтактного и бездефектного обнаружения скрытых дефектов в тонких диэлектрических пленках, нанесенных на металлическое основание, посредством коронного разряда с регулируемыми параметрами тока и напряжения.

Описание установки

Структурная схема экспериментальной установки, созданной для поиска дефектов в лаковых и пленочных покрытиях, представлена на рис. 2.

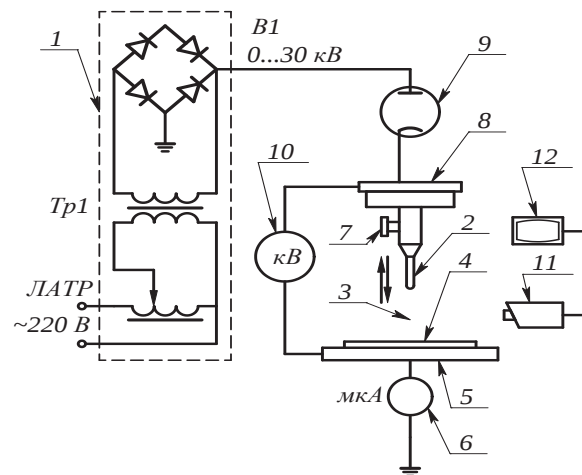


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – высоковольтный блок; 2 – острие (коронирующий электрод); 3 – воздушный промежуток; 4 – диэлектрическое покрытие (или диэлектрическая пленка); 5 – заземленная металлическая подложка; 6 – микроамперметр; 7 – цанговый зажим; 8 – микрометрический винт; 9 – нелинейный элемент (кенотрон); 10 – электростатический киловольтметр С196; 11 – цифровой микроскоп типа «Микрон 800»; 12 – персональный компьютер

Fig. 2. Block diagram of the test bench: 1 is the high-voltage block; 2 is the needle electrode (corona electrode); 3 is the air gap; 4 is the dielectric covering (or dielectric film); 5 is the grounded metal substrate; 6 is the microammeter; 7 is the collet clip; 8 is the micrometric screw; 9 is the nonlinear element (vacuum rectifying tube); 10 is the electrostatic C196 kilovoltmeter; 11 is the digital microscope like «Micron 800»; 12 is the personal computer

Основным элементом установки является высоковольтный блок 1 постоянного регулируемого напряжения в системе «острие 2 – воздушный промежуток 3 – диэлектрическое покрытие (или диэлектрическая пленка) 4 – заземленная металлическая подложка 5». Для получения высокого напряжения с плавной регулировкой в пределах 0...30 кВ. Регистрация тока короны осуществлялась с помощью электромагнитного микроамперметра 6 типа М4204, класс точности 1,5. Для крепления острия (коронирующего электрода) применялся цанговый зажим 7, который вмонтирован в устройство с микрометрическим винтом 8, позволяющим регулировать расстояние между коронирующим острием и заземленной металлической подложкой в пределах 1...15 мм с точностью $\pm 0,1$ мм. Цанговый зажим позволяет зажимать коронирующие электроды диаметром 0,1...2,0 мм. Измерение расстояния между металлической подложкой и кончиком коронирующего электрода (проводник 2) контроли-

руется следующим способом. Первоначально определяется расстояние между кончиком коронирующего электрода и заземленной металлической подложкой с помощью катетометра типа КМ-6, который позволяет определять расстояние с точностью до 0,01 мм. Затем в процессе экспериментов расстояние определялось по лимбу на микрометрическом винте с погрешностью 0,1 мм, что при расстояниях более 3 мм между коронирующим электродом и металлической подложкой обеспечивало погрешность в определении расстояния не более 3 %. Для ограничения тока короткого замыкания, которое возможно в процессе экспериментов, в установке предусмотрен нелинейный элемент (9), который выполнен на базе кенотрона типа 1Ц21П. Измерение напряжения между коронирующим электродом и заземленной металлической подложкой осуществляется посредством электростатического киловольтметра 10 типа С196 (класс точности 1,0), что позволяет свести к минимуму влияние измерительного прибора на процессы коронирования.

Оптическая визуализация явлений в промежутке при коронном разряде осуществляется посредством цифрового микроскопа (11) типа «Микрон 800» и персонального компьютера (12).

Для регулирования напряжения на коронирующем электроде использовались ЛАТР-1, повышающий Тр1, выпрямительный мост В1 (на базе диодов Д1008).

Предварительные эксперименты по определению сквозных дефектов в тонких диэлектрических пленках показали, что при пробое в промежутке между острым электродом и металлической подложкой происходит повреждение диагностируемой пленки и изменение кончика острейного электрода токами короткого замыкания [16]. Чтобы исключить эти повреждения, которые могут вывести из строя элементы радиоэлектронной аппаратуры, в разрядный контур был введен нелинейный элемент (кенотрон типа 1Ц21П) [17]. Регулируя накал кенотрона, можно было менять предельный ток лампы, ограничивая тем самым ток короткого замыкания при пробое между электродом и металлической подложкой в случае искрового пробоя между ними. Вольтамперные характеристики лампы 1Ц21П в зависимости от тока накала приведены на рис. 3. В процессе экспериментов ток накала 1Ц21П можно выбирать таким, чтобы в случае пробоя между электродами (рис. 2) не происходило разрушения диагностируемого диэлектрического покрытия и радиоэлектронной аппаратуры, защищаемой диэлектрическим покрытием.

Система электродов в данной установке образована иглой и плоскостью. Игла обладает большой кривизной поверхности, это приводит к резкой неоднородности поля, что позволяет значительно снизить требуемое напряжение зажигания коронного разряда. Как результат снижается вероятность повреждения поверхности покрытия и подложки [18].

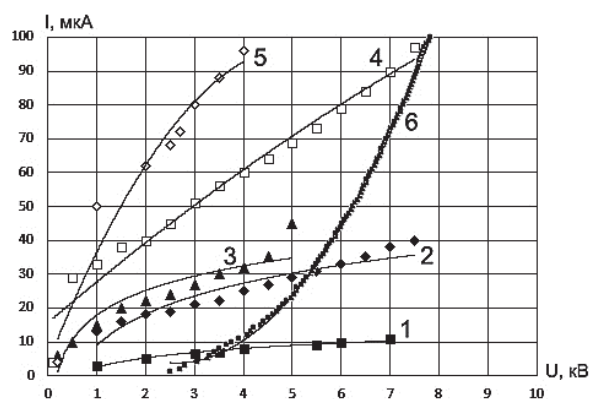


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики 1Ц21П для разных значений тока накала кенотрона: 1 – 0,42; 2 – 0,43; 3 – 0,44; 4 – 0,445; 5 – 0,45 А. 6 – вольт-амперная характеристика электродной системы острие-плоскость при расстоянии между электродами 6 мм и токе накала 0,445 А (диаметр острия 0,18 мм)

Fig. 3. Current-voltage characteristics 1Ts21P for different values of vacuum rectifying tube heater current: 1 – 0,42; 2 – 0,43; 3 – 0,44; 4 – 0,445; 5 – 0,45 A. 6 is the volt-ampere characteristic of the needle electrode-plane electrode system at 6 mm distance between the electrodes and heater current of 0,445 A (edge diameter is 0,18 mm)

Для измерения напряжения на коронирующем электроде использовался электростатический киловольтметр типа С196, что исключало его влияние на процессы в коронном разряде и позволяло снимать вольт-амперные характеристики.

В связи с тем, что коронный разряд можно наблюдать визуально и, соответственно, получать дополнительную информацию, в установке предусмотрена видеосъемка световых явлений в процессе получения вольт-амперных характеристик с помощью ПК и цифрового микроскопа типа «Микрон 800» (рис. 2), позволяющего получать увеличенные изображения на персональном компьютере. С помощью этого же микроскопа получены изображения дефектов после их обнаружения (рис. 4, б).

Искровой пробой, возникающий в межэлектродном промежутке, может приводить к повреждению диагностируемого диэлектрика. В первых экспериментах использовали пассивное ограничение тока короткого замыкания при пробое посредством высоковольтного защитного резистора типа КЭВ-5, включенного последовательно в контур. Предполагалось, что использование резистора позволит избежать повреждений диагностируемого диэлектрического покрытия или диэлектрической пленки при пробое между острым электродом и подложкой (рис. 2). Эксперименты показали, что при больших значениях сопротивления защитного резистора (более 10^6 Ом), когда не происходит разрушение пленки, коронный разряд не загорается и скачком переходит в искровой. В результате невозможно получить вольт-амперную характеристику коронного разряда. А при значениях сопротивления защитного резистора менее 10^4 Ом токи короткого замыкания значительно разрушали диагностируемый диэлектрик. Причина разрушительного воздействия – искровой разряд. Канал разряда деформирует стенки отверстия и способен прожечь материал по микротрещине от сквозного отверстия до латентного дефекта [18].

На рис. 4, а представлена фотография искрового пробоя в цепи с ограничительным защитным резистором сопротивлением 150 кОм. Вид пробоя идентичен пробую, происходящему при обнаружении несплошности диэлектрических покрытий с помощью дефектоскопа «Корона 2.2». На рис. 4, б представлена картина последствий этого искрового пробоя, полученная с помощью микроскопа «Микрон 800». Видно, что возникший искровой пробой приводит к повреждению диагностируемого материала, следовательно, делает его не пригодным для дальнейшего применения в конденсаторостроении.

Также при применении резистора в качестве ограничительного элемента необходимы большие значения прилагаемого напряжения – это оказывает влияние на свойства применяемых пленок,

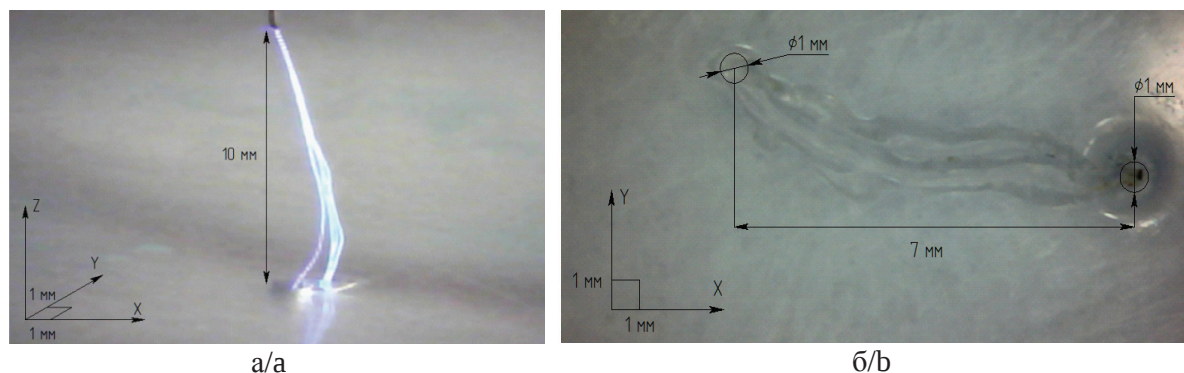


Рис. 4. Вид искрового разряда и его последствий: а – искровой разряд; б – след на поверхности диагностируемой пленки после искрового пробоя при ограничении тока защитным резистором

Fig. 4. Type of the spark discharge and its consequences: a is the spark discharge; b is the trace on the surface of the studied film after the spark at current limit by the protective resistor

что вызовет ухудшение их диэлектрических свойств и сокращение сроков эксплуатации [19].

В качестве альтернативы был опробован способ ограничения тока коронного разряда за счет использования кенотрона. Кенотрон эмиссией электронов с катода ограничивал ток, который можно было регулировать за счет накала нити катода. До достижения пробивного напряжения между электродами 2 и 5 (рис. 2) ток в цепи определяется характеристиками коронного разряда, но не может превысить значение, определяемое пропускной способностью кенотрона за счет эмиссии электронов с катода. При отсутствии пробоя кенотрон фактически не ограничивает ток короны. Таким образом, удастся снять вольт-амперную характеристику коронного разряда.

Используя спроектированную установку, ведутся исследования возможности обнаружения различного вида дефектов покрытий и тонких пленок. В качестве примера на рис. 5 приведена вольт-амперная характеристика системы электродов «острие (электрод 2) – плоскость (электрод 5) (рис. 2) без диэлектрического покрытия.

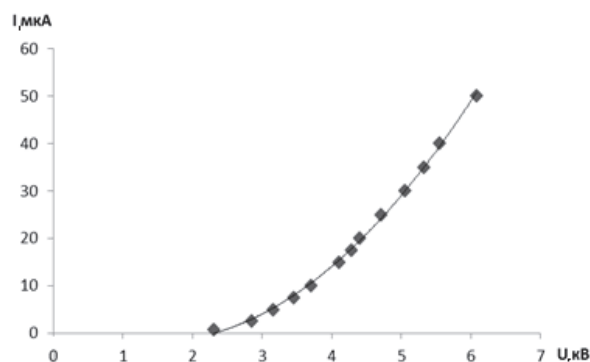


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика системы острей-плоскость: диаметр острей 0,18 мм; расстояние между острей и плоскостью 6 мм; атмосферное давление 764 мм рт. ст.; температура окружающего воздуха 20 °С; ток накала кенотрона 0,445 А.

Fig. 5. Current-voltage characteristic of the needle electrode-plane system: the needle electrode diameter is 0,18 mm; distance between the needle electrode and the plane is 6 mm; atmospheric pressure is 764 mm Hg; ambient air temperature is 20 °C; vacuum rectifying tube heated current is 0,445 A

Условия эксперимента: температура окружающего воздуха в лаборатории 23 °С, давление воздуха 760 мм рт. ст. Влажность в данной работе не учитывалась, так как ее влияние не приводило к изменению тока короны [20, 21]. Измерения проводились по следующей методике: напряжение подавалось с шагом 0,3 кВ до появления минимального тока, который фиксировался микроамперметром (рис. 2). Напряжение, при котором появлялся ток, считали начальным напряжением короны. Появление короны всегда связано с появлением свечения у острей. В случае диагностирования пленок без дефектов ток короны равен нулю до искрового пробоя. В случае диагностирования пленок со сквозными дефектами напряжение появления короны совпадало с напряжением появления короны в системе острей-плоскость без диэлектрического покрытия. При диагностировании диэлектрических пленок со сквозным дефектом всегда наблюдалось свечение вблизи острейного электрода и в месте сквозного дефекта [22–25]. С помощью цифрового микроскопа типа «Микрон-800» место дефекта определяется с высокой точностью.

Результаты

Разработана экспериментальная установка для снятия вольт-амперных характеристик коронного разряда на постоянном напряжении в диапазоне 0...30 кВ. Для ограничения тока короткого замыкания в случае пробоя использован кенотрон типа 1Ц21П, который выступает как нелинейный ограничитель тока короткого замыкания в цепи коронирующего электрода. Ток короткого замыкания между острей и плоскостью можно регулировать накалом катода кенотрона и тем самым изменять в диапазоне от 10 до 90 мкА. Такой способ ограничения тока короткого замыкания позволяет снимать вольт-амперные характеристики без повреждения диагностируемой диэлектрической пленки при искровых пробоях. Установка позволяет диагностировать дефекты различного вида в тонких диэлектрических покрытиях путем снятия вольт-амперных характеристик и визуализации мест дефекта с помощью простого микроскопа типа «Микрон 800» и персонального компьютера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жмуровский Д.И. Влияние энергооборуженности горно-шахтного оборудования на эффективность и надежность производственных процессов в шахте // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 1. – С. 59–62.
2. Шевчук В.П. Исследования повышения надежности работы переменного тока электрических машин в алмазной добывающей промышленности // Труды VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 103–104.
3. Ямансарин И.И. Исследование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей в условиях горно-обогатительного комбината: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Оренбург, 2012. – 120 с.
4. Panich Intra, Nakorn Tippayawong. Comparative Study on Electrical Discharge and Operational Characteristics of Needle and Wire-Cylinder Corona Chargers // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2006. – V. 1. – № 4. – P. 520–527.
5. Point-to-Point Corona Discharge in Admixtures of Argon, Oxygen, and Acetylene / R. Islam, P.D. Pedrov, Shuzheg Xie, K.R. Englund // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2015. – V. 43. – № 10. – P. 3695–3701.
6. Influence of Gas Composition on Corona Discharge Characteristics in the High Temperature / A. Bologna, H.-R. Paur, H. Seifert, K. Woletz // International Journal of Plasma Environmental Science & Technology. – 2011. – V. 5. – № 2. – P. 110–116.

7. Electric potential distribution at the surface of insulating materials exposed to corona discharges from various electrode configurations / A. Reguig, A. Bendaoud, B. Neagoe, Y. Prawatya, L. Dascalescu // Journal of Electrostatics. – 2016. – V. 82. – № 8. – P. 55–62.
8. Lowke J.J., Morrow R. Theory of electric corona including the role of plasma chemistry // Pure & Appl. Chem – 1994. – V. 66. – № 6. – P. 1287–1294.
9. Corona based air-flow using parallel discharge electrodes / Van Thanh Dau, Thien Xuan Dinh, Tung Thanh Bui, Canh-Dung Tran, Hoa Thanh Phan, Tibor Terebessy // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2016. – V. 79. – № 12. – P. 52–56.
10. Очистка дымовых газов ТЭС с помощью электрофильтров. http://vei.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=164/ (дата обращения: 15.02.2016).
11. Артамонов О.Ф. Численное моделирование покрытия в электрическом поле // Электричество. – 2011. – № 11. – С. 46–54.
12. Матвеев А.В., Пюкке Г.А. Емкостной контроль диэлектрической проницаемости изоляционных покрытий проводников // Научные ведомости. Серия: Математика. Физика. – 2015. – № 11 (208). – Вып. 39. – С. 211–215.
13. Паспорт технического устройства: прибор для контроля и обнаружения дефектов изоляционных покрытий электроискровым методом «Корона 2.2» УАЛТ.025.000.00ПС. URL: http://www.sk-ndt.ru/files/korona_22.pdf/ (дата обращения: 15.02.2016).
14. Андрианов В.Р. Устройство для контроля сплошности диэлектрических покрытий на внутренней поверхности металлических цилиндрических изделий / Всемирная организация интеллектуальной собственности, 1990–1992. URL: <https://patentscope.wipo.int> (дата обращения: 15.02.2016).
15. Влияние барьера на форму и структуру коронного разряда в воздухе / Ю.К. Стишков, В.Б. Козлов, А.Н. Ковалев, А.В. Самусенко // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 4. – Т. 46. – С. 315–323.
16. Некоторые особенности коронного разряда в воздухе / С.Б. Афанасьев, Д.С. Лавренюк, И.Н. Петрушенко, Ю.К. Стишков // Журнал технической физики. – 2008. – № 7. – Т. 78. – С. 848–852.
17. Высоковольтные кенотроны // Музей электронных раритетов. 2016. URL: <http://www.155la3.ru/kenotrons.htm> (дата обращения: 15.02.2016).
18. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. – 736 с.
19. Равшанов Д.Ч. Исследование свойств поверхности полимерных пленок из ПП и ПЭ, активированных коронным разрядом // Материалы Международной научно-практической конференции «Передача, обработка, восприятие текстовой и графической информации». – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2015. – С. 135–142.
20. Александров Н.Л., Базелян Э.М., Новицкий Д.А. Влияние влажности на свойства длинных стримеров в воздухе // Журнал технической физики. – 1997. – № 9. – Т. 24. – С. 86–91.
21. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
22. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. – М.: Изд-во Московского физико-технического института, 1997. – 320 с.
23. Development of back corona discharge in a wire-cylinder electrostatic precipitator at high temperatures / Mingjiang Ni, Xihui Wang, Gang Xiao, Kunzan Qiu, Guang Yang, Xiang Gao, Kefa Cen // Powder Technology. – 2015. – V. 286. – № 12. – P. 789–797.
24. An experimental study of relative humidity and air flow effects on positive and negative corona discharges in a corona-needle charger / Artit Yawootti, Panich Intra, Nakorn Tippayawong, Phadungsak Rattanadecho // Journal of Electrostatics. – 2015. – V. 77. – № 10. – P. 116–122.
25. Hong Luo, Xian-Deng Hou, Zhou Long. Miniaturized Corona Discharge-Atomic Emission Spectrometer for Determination of Trace Mercury // Chinese Journal of Analytical Chemistry. – 2015. – V. 43. – № 9. – Iss. 9. – P. 1291–1295.

Поступила 03.03.2016 г.

Информация об авторах

Лавринович В.А., доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Меженский А.А., студент Электроэнергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рахимов Р.С., студент Электроэнергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 537.523.3

EQUIPMENT FOR NON-CONTACT SEARCH OF HIDDEN DEFECTS IN THIN DIELECTRIC FILMS BY CORONA DISCHARGE

Valery A. Lavrinovich¹,

lavrhome@mail.ru

Alexey A. Mezhenyky¹,

alexey.mezenskiy@gmail.com

Rafael S. Rakhimov¹,

rafael555rakhimov@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, 634050, Tomsk, Russia.

Relevance of a subject is caused by the need of diagnostics and prevention of isolation condition of electrical machines in mining and oil branches, where reliability and safety of operation of electric equipment are important. Diagnostics of latent defects allows predicting a residual resource of electric isolation operation, planning preventive tests and timely repairs of electrotechnical equipment of high and low tension.

The aim of the research is to develop the installation, which allows no-contact detecting of various defects: through holes, air pockets, conducting inclusions, reduction of thickness of the thin dielectric coverings, applied on metal base which can be electric conductors with current, printed circuit boards.

Research methods. For obtaining volt-ampere characteristics of the studied corona discharge the constant voltage of different polarity was applied to the studied object, current was recorded in a certain interval in the range of 1...100 mA by means of the M4204 and high voltage was measured within the studied interval in the range of 1...15 kV by means of the electrostatic C196 kilovoltmeter. The visual picture of the corona discharge was recorded by means of «Micron 800» type digital microscope

Results. The paper demonstrates the possibility to determine the through and latent defects of about 10 microns and more measuring the corona discharge current in the needle electrode-plane electrode system and a visual picture of the corona discharge. The paper introduces the experimental results of application of the corona discharge with adjustable parameters of current and tension for determining latent defects in dielectric coverings, applied on the current carrying metal bases, and in thin dielectric films, applied as isolation in modern electrical machines of high and low power. The feature of the installation is application of nonlinear element to restrict short circuit current to the values, which do not cause the damage of a dielectric covering and the corona discharge of adjustable current and tension parameters as the diagnosing tool. The installation contains an adjustable source of constant tension (0 ... 30 kV), the nonlinear adjustable current limiter for preventing short circuit in case of breakdown, the corona current recorder, photo and video registration of optical phenomena of a corona effect.

Key words:

Corona discharge, current, defect, thin film, paint, high voltage, non-linear element.

REFERENCES

1. Zhmurovsky D.I. Vliyaniye energovooruzhennosti gorno-shakhtnogo oborudovaniya na effektivnost i nadezhnost proizvodstvennykh protsessov v shakhte [Effect of available power of mining equipment on efficiency and reliability of production processes in mine]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2006, no. 1, pp. 59–62.
2. Shevchuk V.P. Issledovaniya povysheniya nadezhnosti raboty peremennogo toka elektricheskikh mashin v almasznoy dobyvayushchey promyshlennosti [Research of improving the reliability of the AC electric cars in diamond mining industry]. *Sovremennyye tekhnika i tekhnologii. Trudy vosmoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Modern engineering and technologies. Eighth International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists]. Tomsk, April 12, 2002. pp. 103–104.
3. Yamansarin I.I. Issledovanie ekspluatatsionnoy nadezhnosti asinkhronnykh dvigateley v usloviyakh gorno-obogatitel'nogo kombinata: avtoreferat Dis. Kand. nauk [Investigation of operational reliability of induction motors in mining and processing plant. Cand. Diss. Abstract]. Orenburg, 2012. 120 p.
4. Panich Intra, Nakorn Tippayawong. Comparative Study on Electrical Discharge and Operational Characteristics of Needle and Wire-Cylinder Corona Chargers. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2006, vol. 1, no. 4, pp. 520–527.
5. Rokibul Islam, Partrick D. Pedrov, Shuzheg Xie, Karl R. Englund. Point-to-Point Corona Discharge in Admixtures of Argon, Oxygen, and Acetylene. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, vol. 43, no. 10, pp. 3695–3701.
6. Bologa A., Paur H.-R., Seifert H., Woletz K. Influence of Gas Composition on Corona Discharge Characteristics in the High Temperature. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 110–116.
7. Reguig A., Bendaoud A., Neagoe B., Prawatya Y., Dascalescu L. Electric potential distribution at the surface of insulating materials exposed to corona discharges from various electrode configurations. *Journal of Electrostatics*, 2016, vol. 82, no. 8, pp. 55–62.
8. Lowke J.J., Morrow R. Theory of electric corona including the role of plasma chemistry. *Pure & Appl. Chem.*, 1994, vol. 66, no. 6, pp. 1287–1294.
9. Van Thanh Dau, Thien Xuan Dinh, Tung Thanh Bui, Canh-Dung Tran, Hoa Thanh Phan, Tibor Terebessy. Corona based air-flow using parallel discharge electrodes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, vol. 79, no. 12, pp. 52–56.
10. Ochistka dymovykh gazov TES s pomoshchyu elektrofiltrov [Purification of combustion gases of thermal power plant with the help of electric precipitators]. Available at: <http://vei.ru/index.php?op>

- tion=com_content&task=view&id=164/ (accessed 15 February 2016).
11. Artamonov A.F. Chislennoe modelirovanie pokrytiya v elektricheskom pole [Numerical modeling of the coating in electric field]. *Electricity*, 2011, no. 11, pp. 46–54.
 12. Matveev A.V., Pyukke G.A. Capacitive control of permittivity of conductor insulation coatings. *Scientific sheets. Series: Mathematics. Physics*, 2015, no. 11 (208), Iss. 39, pp. 211–215. In Rus.
 13. *Pasport tekhnicheskogo ustroystva: pribor dlya kontrolya i obnaruuzheniya defektov izolyatsionnykh pokrytiy elektroiskrovym metodom «Korona 2.2» UALT.025.000.00PS* [Technical passport of the device: a device for monitoring and detecting defects in the insulating coating by the electric spark method «CROWN 2.2» UALT.025.000.00PS]. Available at: http://www.sk-ndt.ru/files/korona_22.pdf/ (accessed 15 February 2016).
 14. Andrianov V.R. Ustroystvo dlya kontrolya sploshnosti dielektricheskikh pokrytiy na vnutrenney poverkhnosti metallicheskih tsilindricheskikh izdeliy [Device for checking dielectric coats continuity on inner surface of cylindrical metal items]. *Vse-mirnaya organizatsiya intellektualnoy sobstvennosti* [World intellectual property organization]. 1990–1992. Available at: <https://patentscope.wipo.int> (accessed 15 February 2016).
 15. Stishkov Yu.K., Kozlov V.B., Yakovlev A.N., Samusenko A.V. Vliyanie bareara na formu i strukturu koronnogo razryada v vozdukhe [Barrier effect on form and structure of the corona discharge in the air]. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 315–323.
 16. Afanasev S.B., Lavrenyuk D.S., Petrushenko I.N., Stishkov Yu.K. Nekotorye osobennosti koronnogo razryada v vozdukhe [Peculiarities of the Corona Discharge in Air]. *Technical Physics*, 2008, vol. 78, no. 7, pp. 848–852.
 17. Vysokovoltnye kenotrony [High kenotron]. *Muзей elektronnykh raritetov* [Museums of electron rare objects]. Available at: <http://www.155la3.ru/kenotrons.htm> (accessed 15 February 2016).
 18. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Gas discharge physics]. Dolgoprudny, Intellect Publ. house, 2009. 736 p.
 19. Revshanov D.Ch. Issledovanie svoystv poverkhnosti polimernykh plenok iz PP i PE, aktivirovannykh koronnym razryadom [Studying the properties of the polymer film surface of PP and PE, activated by corona discharge]. *Peredacha, obrabotka, vospriyatie tekstovoy i graficheskoy informatsii. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transmission, processing, perception of text and graphic information. International scientific-practical conference]. Yekaterinburg, URFA Publ. house, 2015. pp. 135–142.
 20. Aleksandrov N.L., Bazelyan E.M., Novitsky D.A. Vliyanie vlazhnosti na svoystva dlinnykh strimerov v vozdukhe [Influence of humidity on properties of long streamers in the air]. *ZhTF*, 1997, vol. 24, no. 9, pp. 86–91.
 21. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Gas discharge physics]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 536 p.
 22. Bazelyan E.M., Raiser Yu.P. *Iskrovoy razryad* [Spark discharge]. Moscow, MFTI Press, 1997. 320 p.
 23. Mingjiang Ni, Xihui Wang, Gang Xiao, Kunzan Qiu, Guang Yang, Xiang Gao, Kefa Cen. Development of back corona discharge in a wire-cylinder electrostatic precipitator at high temperatures. *Powder Technology*, 2015, vol. 286, no. 12, pp. 789–797.
 24. Artit Yawootti, Panich Intra, Nakorn Tippayawong, Phadungsak Rattanadecho. An experimental study of relative humidity and air flow effects on positive and negative corona discharges in a corona-needle charger. *Journal of Electrostatics*, 2015, vol. 77, no. 10, pp. 116–122.
 25. Hong Luo, Xian-Deng Hou, Zhou Long. Miniaturized Corona Discharge-Atomic Emission Spectrometer for Determination of Trace Mercury. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2015, Iss. 9, vol. 43, no. 9, pp. 1291–1295.

Received: 02 March 2016.

Information about the authors

Valery A. Lavrinovich, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexey A. Mezhenzsky, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Rafael S. Rakhimov, student, National Research Tomsk Polytechnic University.