

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРЕДПРОБОЙНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КЕРАМИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА В ВАКУУМЕ

© 2012 г. В. Л. Кузнецов, Д. С. Скоморохов, В. А. Бессонова, В. В. Уварин

*Институт электрофизики УрО РАН
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106*

E-mail: kuznetsov@iep.uran.ru

Поступила в редакцию 20.12.2011 г.

Описана установка для исследования предпробойных явлений на поверхности катодных изоляторов в вакууме. Установка воспроизводит условия, в которых находится изолятор при работе реального вакуумного устройства. Приведены результаты изучения воздействия на поверхность изолятора потоков заряженных частиц, рентгеновского или светового излучения в вакуумной камере при ступенчатом повышении приложенного напряжения до 150 кВ. Для прогнозирования развития высоковольтного пробоя в процессе измерений одновременно регистрируются несколько параметров: давление в вакуумной камере, газовый состав, токи утечки по поверхности изолятора и через вакуумный промежуток. Запись данных ведется в автоматическом режиме, собранная информация сохраняется на жестком диске компьютера.

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая прочность изоляторов зависит от многих факторов, например: от конфигурации и материала электродов и собственно изолятора, расстояния между ними, давления и состава остаточных газов, состояния и шероховатости поверхности, технологии изготовления и подготовки изоляторов к работе, предшествующей работы изделия [1]. Особенно жесткие требования предъявляются к высоковольтным изоляторам в рентгеновских медицинских приборах, где пробой изолятора приводит к приостановке диагностики пациентов и длительному дорогостоящему ремонту рентгеновского излучателя.

Одной из причин отказа катодного изолятора может быть необратимое изменение изоляционных свойств изделия в результате пробоя. Для анализа электрической прочности изолятора необходимо на основании результатов исследования предпробойных процессов уметь моделировать возможные механизмы развития пробоя, выработать соответствующие критерии, а также выявить критические области, в которых происходит зарождение поверхностного пробоя. Предпробойные процессы достаточно подробно изучены для электродов, разделенных вакуумным зазором [2, 3]. Явления на поверхности керамических изоляторов в высоком вакууме исследованы недостаточно полно.

Объемные свойства изолятора мало изменяются со временем. В то же время находящаяся в вакууме наружная поверхность изолятора испытывает перепады давления, подвергается электронной и ионной бомбардировке, облучается

светом и рентгеновскими лучами. Ранее различными группами исследователей проводились эксперименты с образцами изолирующих материалов с контролем изменения какого-то одного конкретного параметра. Например, в работе [4] изучали изменение газового состава при пробое изоляторов в вакууме, а в работе [5] рассмотрено влияние формы изолятора на пробивное напряжение.

В данной работе реализован комплексный подход к исследованию процессов, происходящих перед пробоем на поверхности изолятора в вакууме. Для изучения предпробойных процессов создана установка, моделирующая несколько видов воздействия на изолятор. Система сбора информации позволяет одновременно записывать приложенные напряжения, токи вдоль поверхности изолятора и через вакуумный промежуток, регистрировать давление в экспериментальном объеме, а также осуществлять масс-спектрометрический контроль газового состава. В качестве объектов исследования использовались сборки катодного узла рентгеновской трубки с вращающимся анодом для компьютерного томографа с рабочим напряжением до 140 кВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Созданная нами экспериментальная система состоит из двух сверхвысоковакуумных установок, предназначенных для исследования электрических характеристик высоковольтных изоляторов в условиях, имитирующих различные режимы работы рентгеновского источника с вращающимся

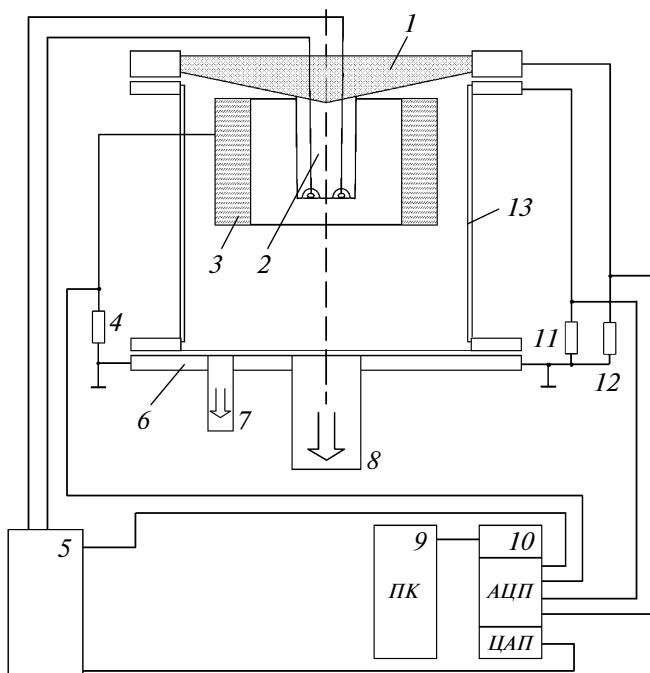


Рис. 1. Схема экспериментальной установки № 1. 1 – изолятор; 2 – катодный узел; 3 – коллектор электронов; 4, 11, 12 – измерительные сопротивления; 5 – высоковольтный источник (160 кВ, 15 мА); 6 – фланец вакуумной системы; 7 – масс-спектрометр МХ7304; 8 – вакуумная система; 9 – компьютер; 10 – блок ЦАП/АЦП; 13 – корпус рентгеновской трубки.

анодом. Система снабжена также устройствами сбора и обработки информации.

Экспериментальная установка № 1 (рис. 1) собрана на базе вакуумного поста с паромасляным насосом на поливиниловом эфире и азотной ловушкой с остаточным давлением до 10^{-8} Торр. Такая схема откачки вакуумного поста имитирует газовый состав вакуумного объема рентгеновских источников.

Рабочий корпус 13 исследуемого рентгеновского источника крепится на фланце вакуумного поста 6 через изоляционный вкладыш и резиновое уплотнение (ИРП-1345). Внутри корпуса установлен коллектор электронов 3, а сверху монтируется катодный узел 2 с керамическим изолятором 1. Ток утечки на коллектор измеряется на сопротивлении 4. Измерительные сопротивления 11 и 12 предназначены для регистрации токов утечки по изолятору 1 и на корпус рентгеновского излучателя. Вакуумная система 8 оснащена радиочастотным масс-спектрометром МХ7304 (7) (диапазон регистрации $m/e = 1-300$, скорость развертки до 10 м/с). Сбор информации осуществляется универсальным восьмиканальным блоком ЦАП/АЦП (10) под управлением персонального компьютера ПК (9) по протоколу RS-232. Этот же блок управляет уровнем напряжения на высоковольтном ис-

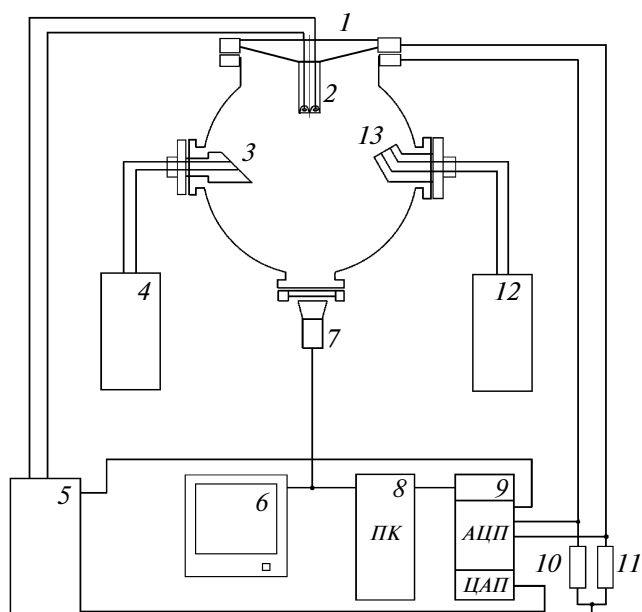


Рис. 2. Схема экспериментальной установки № 2. 1 – изолятор; 2 – катодный узел; 3 – источник электронов и рентгеновского излучения; 4 – блок питания рентгеновского источника; 5 – высоковольтный источник (160 кВ, 15 мА); 6 – монитор; 7 – п.з.с.-камера; 8 – компьютер; 9 – блок ЦАП/АЦП; 10, 11 – измерительные сопротивления; 12 – блок питания ионного источника; 13 – ионная пушка.

точнике 5 и регистрирует действующее значение напряжения. Для изучения вольт-амперных характеристик используется оригинальное программное обеспечение, позволяющее изменять высокое напряжение на катодном изоляторе по заданному алгоритму или вручную.

Основой экспериментальной установки № 2 (рис. 2) является вакуумный пост УСУ-4, оснащенный криогенным и магнитоэридным насосами, обеспечивающими остаточное давление до 10^{-9} Торр. Безмасляная схема откачки позволяет исследовать предпробойные процессы на внутренней поверхности изолятора, обусловленные в первую очередь материалом изолятора и его конструктивными особенностями. В отличие от установки № 1 корпус рентгеновского источника и коллектор электронов на данный вакуумный пост не устанавливались.

Установка № 2 оснащена фланцем для монтажа катодного изолятора 1 в сборе с катодным узлом 2. В измерительной камере смонтированы источник электронов и рентгеновского излучения 3 и ионная пушка 13, подключенные к соответствующим блокам питания 4, 12. Ионный источник собран по схеме Байярда–Альперта. Видеорегистрация осуществляется п.з.с.-камерой 7 с выводом на монитор 6 и записью на персональный компьютер 8. Для регистрации токов утечки

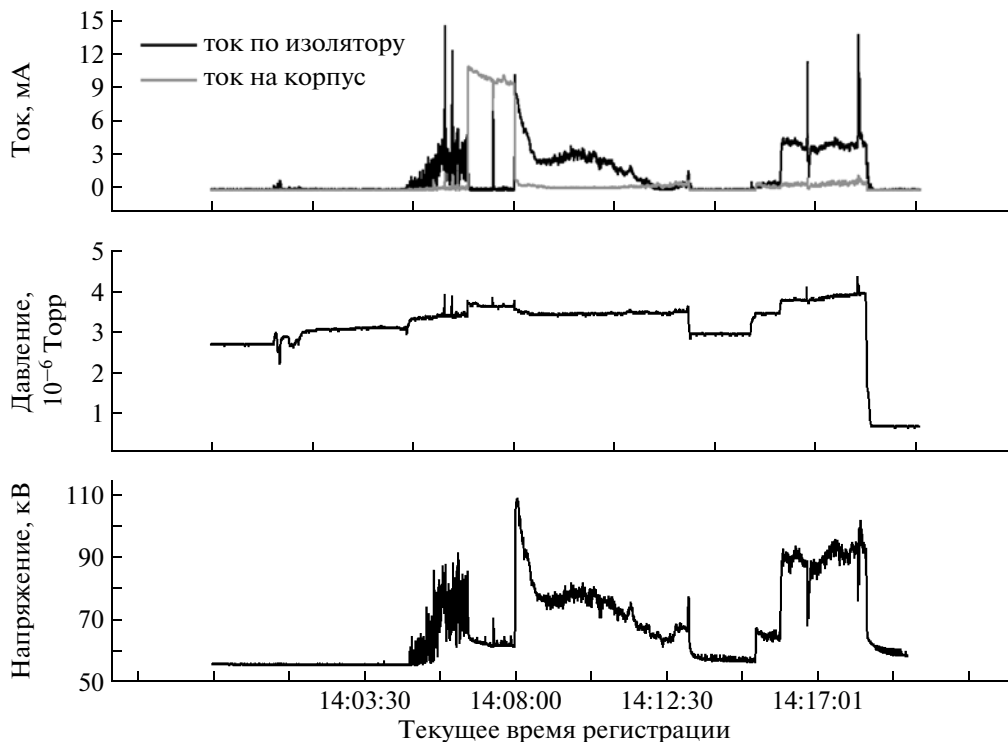


Рис. 3. Регистрация предпробойных явлений на установке № 1.

по поверхности изолятора и на корпус вакуумной камеры измеряется падение напряжения на резисторах 11 и 10. Эти данные вместе с действующим значением высокого напряжения записываются блоком ЦАП/АЦП (9) под управлением ПК (8). Для обеспечения развертки используется канал управления источником высокого напряжения 5 по программе, определяемой пользователем.

СИСТЕМА СБОРА ИНФОРМАЦИИ

Система сбора и обработки экспериментальных данных реализована на базе устройства ввода/вывода RL-88АС. Блок RL-88АС является внешним по отношению к компьютеру, он имеет отдельный источник питания и подключается к последовательному порту компьютера с помощью стандартного кабеля по протоколу RS-232 [6]. Кабель может быть подключен через блок гальванической развязки ОI-232-1000 с напряжением развязки до 1 кВ. Для измерения тока и записи полученных данных в файл используются усилители RL-4DA200 с калиброванными резисторами. При усилении 200 (для RL-4DA200) соотношение измерительного резистора выбирается из соотношения $R_0 = (10 \text{ В}/I_{\text{max}})/K_y$, где I_{max} — предел измерения тока, K_y — коэффициент усиления.

Разработанное программное обеспечение позволяет регистрировать данные, получаемые в течение длительного времени (до нескольких су-

ток), формировать управляющие сигналы для моделируемых процессов и сохранять их на жестком диске в формате, пригодном для последующей обработки: MS Excel, MathCAD, MathLab, а также управлять внешними устройствами по 8 каналам. Масштаб преобразования ЦАП и АЦП составляет 12 бит, выходное/входное напряжение 10.24 В, минимальное время измерения 1.53 мс.

Созданная система сбора информации позволяет регистрировать:

- изменение газового состава вакуумной камеры, рентгеновского источника в процессе дегазации и в рабочем режиме (установка № 1);
- давление остаточных газов (установки № 1, № 2);
- предпробойные токи на стадии тренировки (установки № 1, № 2);
- распределение токов утечки между электродами рентгеновского источника (установки № 1, № 2);
- токи утечки через изолятор под действием светового и рентгеновского излучения, ионной и электронной бомбардировки (установка № 2);
- перенос продуктов испарения вещества катода и анода в процессе эксплуатации рентгеновского источника (установка № 1);
- текущие пробойные явления в видеоформате (установка № 2).

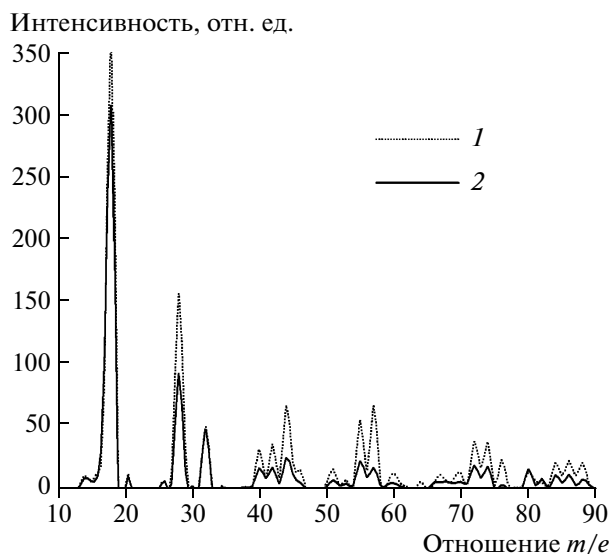


Рис. 4. Масс-спектры состава остаточных газов до (1) и после (2) прогрева изолятора и корпуса.

Обработка и анализ полученных данных позволяют выявить факторы, влияющие на высоковольтную прочность керамических изоляторов, прогнозировать начало предпробойных процессов для предотвращения необратимых изменений, вызванных электрическим пробоем изолятора, и сформулировать рекомендации по увеличению пробивного напряжения существующего изолятора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Система сбора информации выводит данные на экран компьютера в режиме самописца и фор-

мирует итоговый файл со столбцами данных. Количество столбцов соответствует числу измеряемых параметров. Зависимости, необходимые для анализа, оформляются в виде графиков, как показано, например, на рис. 3.

При повышении напряжения, начиная с определенного уровня, наблюдается протекание предпробойного тока по поверхности изолятора, которое сопровождается увеличением давления. При дальнейшем повышении напряжения обнаружено, что происходит переход предпробойных токов с изолятора на корпус (время по шкале 14:06–14:08). Снижение давления при преобладании токов с катода на корпус рентгеновской трубки свидетельствует о том, что выделение газа происходит преимущественно с поверхности катодного изолятора.

Исследование состава остаточных газов с помощью масс-спектрометра МХ-7304 позволило выявить значительное содержание воды (H_2O , масса 18), азота и окиси углерода (N_2 и CO , массы 28). Внешний прогрев изолятора и корпуса рентгеновской трубки до температуры $400^\circ C$ в течение нескольких часов приводит к снижению интенсивности этих пиков, а также заметному снижению интенсивности пиков тяжелых углеводородов (массы 55, 57, 72, 74). Масс-спектр остаточных газов вакуумного объема до и после прогрева представлен на рис. 4.

В нескольких экспериментах испытания на электрическую прочность с записью видеоряда проводились при облучении поверхности изолятора видимым светом и мягким рентгеновским излучением. Для имитации этих воздействий в вакуумном объеме исследовательской камеры смонтированы катодный узел мощностью 10 Вт,

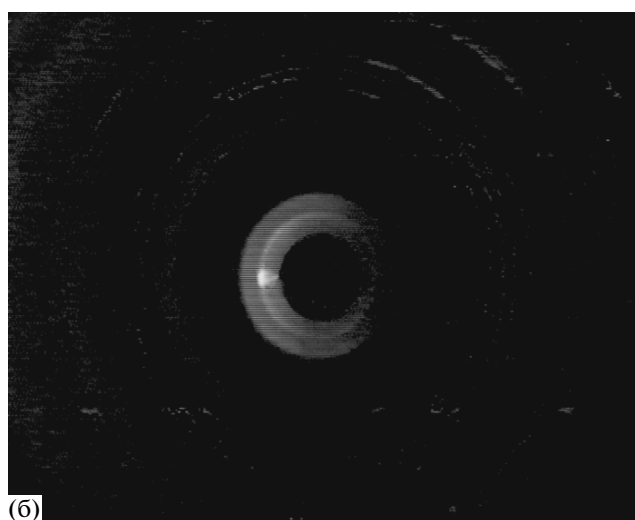


Рис. 5. Видеорегистрация предпробойных явлений на поверхности изолятора: а – опорный кадр без предпробойных явлений; б – кадр, полученный вычитанием опорного.

генерирующий поток светового излучения ~300 лм при световой температуре 2700 К, а также источник мягкого рентгеновского излучения с разностью потенциалов между электродами 2 кВ. При работе накаливаемого катода изолятор был ярко освещен, что затрудняло выявление мест возникновения предпробойных процессов. Для анализа таких изображений был применен метод математической обработки, заключающийся в вычитании кадра с изображением изолятора из кадра, зафиксировавшего предпробойный процесс. На рис. 5а приведен опорный кадр, на котором представлен изолятор А-PRIME под воздействием потока света в отсутствие пробойных явлений, а на рис. 5б — кадр с частичным разрядом, полученный вычитанием опорного кадра.

В ходе проведения экспериментов было отмечено, что развитие пробоя под действием светового потока происходит, как правило, в области прикатодной впадины изолятора. Наиболее хорошо это заметно на изоляторах без катодного узла, поскольку при установке катода зона возникновения разрядов смещается в область, затененную катодом, что затрудняет локализацию пробойного явления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная система установок является универсальным инструментом для исследования явлений на поверхности высоковольтных изоляторов, применяющихся в вакуумных приборах.

Параллельная регистрация нескольких параметров при изучении предпробойных явлений на поверхности изоляторов в вакууме позволяет лучше понимать процессы, приводящие к пробоям изолятора. Это дает возможность не только выявлять места зарождения пробоев для конкретного изолятора, но и вырабатывать алгоритмы, по которым следует тренировать изолятор после его монтажа в готовое устройство. Например, исследование масс-спектров остаточных газов доказывают необходимость длительного прогрева как изолятора, так и корпуса готового устройства. Контроль давления остаточных газов позволяет отслеживать интенсивность протекания предпробойных токов и сформулировать требования к подготовке поверхности при высоковольтной тренировке изолятора в вакууме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ушаков В.Я.* Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1994.
2. *Сливков И.Н.* Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. *Латам Р.* Вакуумная изоляция установок высокого напряжения / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. *Miller H.C., Ney R.J.* // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. № 3. P. 668.
5. *Wetzer J.M., Wouters P.* // IEEE Trans. DEI. 1995. V. 2. № 2. P. 202.
6. *Денисенко В.В., Кильметов Р.С., Трубочев О.Е., Халвякко А.Н.* // ПТЭ. 2009. № 1. С. 171.