

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ЖИДКОСТЕЙ

В.Ф.Климкин

Введение

Статистическая природа явления пробоя предполагает статистическую обработку экспериментальных данных. Важная информация о предпробивных процессах может быть получена из анализа распределения вероятностей некоторых характерных величин (пробивной напряженности, времени запаздывания пробоя, длительности предпробивного свечения и др.). Точность статистического описания возрастает с увеличением объема выборки N , где N — число последовательных измерений (закон больших чисел). Согласно центральной предельной теореме, если N велико и отдельные значения случайной величины не коррелированы, то распределение выборочного среднего подчиняется нормальному с дисперсией σ^2/N , где σ^2 — дисперсия отдельного измерения. Этот результат справедлив для любого распределения случайной величины (при несущественных в практических случаях ограничениях), что дает надежные доверительные пределы для среднего значения, если $N \gtrsim 30$ и распределение не очень асимметрично. Что касается оценок среднеквадратичного отклонения, коэффициентов корреляции и статистической проверки гипотез, то в этих случаях N должно превышать 100 [1]. Например, в случае гауссова распределения и $N = 100$ относительная ошибка определения выборочной дисперсии составляет 14%, а среднеквадратичного отклонения примерно вдвое меньше. При осциллографической регистрации величин с последующей ручной обработкой исходных данных проведение статистического анализа требует значительных усилий и времени. Трудоемкость исследований может быть существенно снижена, а точность измерений повышена при использовании средств, позволяющих автоматизировать сбор, накопление и обработку результатов. Работа экспериментальной установки на линии с ЭВМ обеспечивает анализ поступающей информации прямо в ходе измерений, что позволяет осуществлять контроль за ходом эксперимента. При создании подобных автоматизированных систем требуется решение вопросов, связанных с сопряжением измерительной аппаратуры с электронно-вычислительным устройством и устойчивостью системы к внешним помехам. Предварительные результаты, касающиеся автоматизации статистических исследований импульсного электрического пробоя жидкостей, приведены в [2]. Они показали высокую эффективность такого подхода к организации эксперимента.

В данной работе приводится описание автоматизированной системы и представлены результаты ее применения для анализа статистических распределений времени запаздывания пробоя в жидкостях.

Автоматизированная измерительно-вычислительная система выполнена на основе терминальной вузовской системы (ТЕВУС) Новосибирского государственного университета (НГУ) на базе микроЭВМ „Электроника-60" с применением стандарта „КАМАК". Схема построения ТЕВУС позволяет создавать автоматизированные комплексы для обслуживания физического эксперимента, удаленные от центральной ЭВМ и не требующие собственных периферийных устройств (ввода-вывода, запоминающих устройств на магнитных дисках и др.). В системе трансляция, сборка и отладка программ выполняются на центральной ЭВМ, а набор, редактирование и счет — на периферийных ЭВМ. При создании автоматизированной системы учитывался опыт, накопленный в классе технических средств автоматизации научных исследований (ТСАНИ) физического факультета НГУ.

Принципиальная схема автоматизированной системы приведена на рис. 1. Импульсное напряжение с амплитудой до 40 кВ, формируемое генератором импульсных напряжений (ГИН), прикладывается к разрядному промежутку K , заполненному жидким диэлектриком. Длительность фронта импульсов ~ 10 нс, а плоской части ~ 5 мкс. В момент пробоя промежутка происходит резкий спад напряжения (в течение нескольких наносекунд) и формируется импульс примерно прямоугольной формы. Для измерения его длительности (времени запаздывания пробоя) используется частотомер ЧЗ-54. Ослабление уровня входного сигнала осуществляется малоиндуктивным резистивным делителем (R_1, R_2), установленным вблизи разрядной камеры. Сигнал поступает на входной канал измерителя интервалов времени, запуская его передним фронтом импульса напряжения (положительный перепад) и останавливая задним (отрицательный перепад), соответствующим моменту пробоя промежутка. Прибор имеет автоматический сброс-пуск и обеспечивает непосредственный отсчет результатов измерения на цифровом табло. Погрешность измерения времени составляет 10 нс, сопротивление входного канала 50 Ом. После окончания счета выдается командный сигнал на запуск входного регистра и информация о значении измеряемой величины передается в его функциональную часть. Для организации связи между функциональными модулями и микроЭВМ используется контроллер крейта К-16. Оперативное взаимодействие с ЭВМ в диалоговом режиме осуществляется с помощью алфавитно-цифрового дисплея (АПД) на базе черно-белого телевизора „Юность-405" с сенсорной клавиатурой. Для представления экспериментальных результатов в графической форме используется цветной графический дисплей (ЦДР) на базе цветного телевизора „Электроника-432". Копии информации с экрана получают с помощью алфавитно-цифрового печатающего устройства (АЦПУ) DZM-180. В качестве центральной машины используется ЭВМ типа СМ-4. Основная часть комплекса размещается в стандартной стойке КАМАК, рядом со стойкой располагаются частотомер и АЦПУ. Поскольку стойка удалена от высоковольтной части установки, то связь с частотомером осуществляется по коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением 50 Ом. Специально созданные программы (в сочетании с программными средствами ТЕВУС) дают возможность производить сбор, накопление, оперативную по ходу эксперимента обработку данных и выводить на экран дисплея

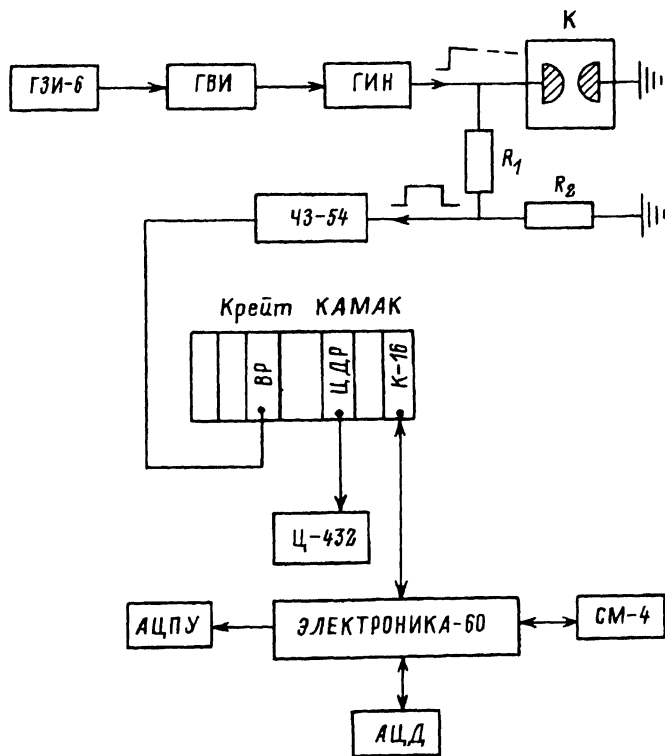


Рис. 1. Принципиальная схема автоматизированной системы.

ГВИ — генератор высоковольтных импульсов, ВР — модуль входного регистра; $R_2 = 50 \text{ Ом}$.

или на печатающее устройство гистограммы, лауэграммы и параметры статистических распределений: выборочное среднее время запаздывания пробоя, выборочное среднее квадратичное отклонение (эмпирический стандарт), среднее квадратичное отклонение среднего, дрейф параметров и др. Возможности программного обеспечения проверялись в вычислительном эксперименте на модели случайной величины, соответствующей нормальному закону распределения вероятности. Реальный эксперимент моделировался набросом шума в 3–10%. Калибровка автоматизированной измерительной-вычислительной системы осуществляется с помощью кабельного генератора импульсных напряжений с фиксированными значениями длительности прямоугольных импульсов 10, 30 и 100 нс. В целом эти результаты продемонстрировали высокую степень надежности метода.

Режим работы установки задается генератором задержанных импульсов ГЗИ-6, управляющим моментом подачи напряжения на разрядный промежуток. При работе ГЗИ-6 в автоматическом режиме с характерной частотой 0.1 Гц для проведения 150 измерений (один цикл) требуется 25 мин. В процессе работы контролируется состояние разрядного промежутка оптическим методом.

Во избежание потери информации из-за сбоя программы предусмотрен вариант автономной обработки данных. Сравнительно невысокие скорости поступления информации позволяют записывать результаты

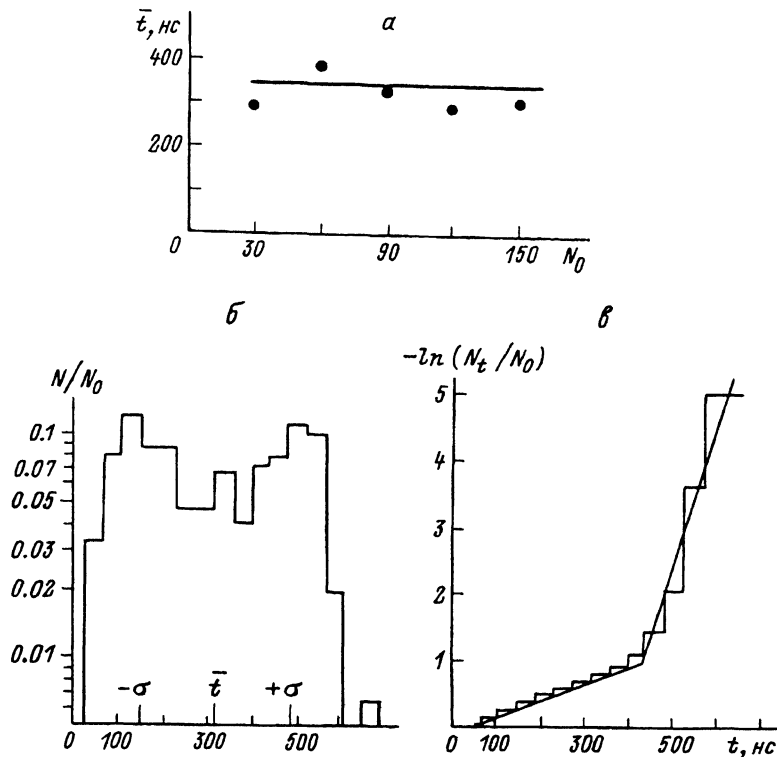


Рис. 2. Результаты статистического анализа времени запаздывания пробоя в h -гексане.

a — зависимость среднего времени запаздывания от числа пробоев; $б$ — гистограмма результатов 150 измерений времени запаздывания пробоя, σ — среднеквадратичное отклонение; $в$ — распределение времени запаздывания пробоя в координатах Лауэ.

измерений с экрана частотомера в процессе эксперимента и затем вводить их в микроЭВМ для последующей обработки. Например, для ввода 150 данных с помощью клавишного пульта оператору требуется около 10 мин.

Экспериментальные результаты

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты статистического анализа времени запаздывания пробоя в h -гексане. Они соответствуют квазиоднородному электрическому полю напряженностью $\lesssim 1.6$ МВ/см и расстоянию между электродами 100 мкм. Условия эксперимента аналогичны описанному в [3]. При получении зависимости (а) брались пять групп последовательных измерений по 30 результатов в каждой группе при полном числе наблюдений 150. Для каждой группы определялось среднее время запаздывания пробоя (темные кружки). Предполагая, что среднее время запаздывания и число пробоев связаны линейно, экспериментальные точки аппроксимировались прямой методом наименьших квадратов. Видно, что среднее время запаздывания практически не зависит от числа пробоев, что указывает на отсутствие последствия, т.е. влияния пробоев на механизм электрического разряда.

Гистограмма результатов измерений времени запаздывания пробоя приведена на рис. 2,б. Здесь по вертикальной оси отложены частоты, показывающие долю полного числа пробоев, приходящихся на каждый интервал разбиения. Гистограмма привлекает внимание наличием двух явно выраженных пиков. Сопоставление с результатами оптических наблюдений показывает, что это обусловлено существованием и конкуренцией двух различных механизмов пробоя. Причем один из них соответствует электрическому разряду с катода, а другой — разряду с анода. По данным рис. 2,б среднее время запаздывания пробоя составляет $310 \pm \pm 20$ нс, а среднее квадратичное отклонение 160 нс.

Распределение времени запаздывания пробоя, построенное по методу Лауэ [4], показано на рис. 2,в. Здесь N_t — число импульсов, при которых время запаздывания равно или больше t . Сплошная кривая представляет идеализированное предельное распределение. Видно, что $\ln(N_t/N_0)$ меняется с t приблизительно линейно, т.е. время запаздывания пробоя подчиняется экспоненциальному закону распределения. Особенностью кривой является наличие изгиба в точке с ординатой, примерно равной 1. Такое поведение кривой Лауэ может быть описано математической моделью, основанной на суперпозиции двух экспоненциальных распределений, соответствующих конкурирующим, статистически независимым событиям с различными характеристическими временами. Таким образом, форма кривой Лауэ с изломом указывает на возможность существования двух конкурирующих и независимых механизмов пробоя, что является подтверждением результатов оптических наблюдений. Из анализа совместных распределений можно оценить параметры процессов, составляющих механизмы пробоя [5]. Например, для пробоя с катода среднее статистическое время запаздывания составляет около 40 нс, а среднее время формирования 430 нс. Для пробоя с анода они равны 380 и 50 нс соответственно. Средняя скорость формирования разряда с анода составляет $\sim 2 \cdot 10^5$ см/с и примерно на порядок больше, чем с катода. Полученные результаты находятся в качественном согласии с данными оптических измерений [3].

Прямая корреляция результатов оптических и статистических исследований значительно повышает роль статистического анализа и открывает новые возможности при изучении влияния различных факторов на механизмы пробоя с катода и анода.

В заключение следует отметить, что применение автоматизированной измерительно-вычислительной системы более чем на порядок повысило скорость получения и обработки экспериментальных данных. С ее помощью проведены систематические статистические исследования импульсного электрического пробоя h -гексана в зависимости от напряженности поля, расстояния между электродами, внешнего давления. Это позволило получить качественно новые результаты, касающиеся механизмов зарождения и развития электрического разряда.

Автор признателен А.М.Осодоеву за помощь при выполнении работы.

Список литературы

- [1] Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1967. 242 с.
- [2] Климкин В.Ф. // Тр. IV Всесоюз. конф. "Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности". Николаев, 1988. Ч. 1. С. 74-75.

- [3] Климкин В.Ф. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 10. С. 2041–2043.
 [4] Мик Дж. Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М.: ИЛ, 1960. 605 с.
 [5] Авроров А.П., Воробьев В.Г. Препринт ИЯФ СО АН СССР. № 83–69. Новосибирск, 1983. 32 с.

Новосибирский университет

Поступило в Редакцию
14 сентября 1991 г.

01;10
© 1992 г.

Журнал технической физики, т. 62, в. 9, 1992

АКСЕПТАНС КВАДРУПОЛЬНОГО ФИЛЬТРА МАСС В РЕЖИМЕ РАБОТЫ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ

*Н.В.Коненков, Г.А.Могильченко,
С.С.Силаков*

1. С целью оптимизации согласования источника ионов и квадрупольного фильтра масс (КФМ) необходимо знание аксептанса анализатора. Аксептанс КФМ характеризуют областями пропускания на фазовой плоскости поперечных координат и скоростей влета ионов в анализатор [1,2]. Если для обычного режима аксептанс исследован достаточно полно [1–7], то для режима работы в четырехугольнике стабильности — промежуточной зоны [8] такие данные отсутствуют. Поэтому целью работы на первом этапе является исследование аксептанса идеального фильтра масс.

2. Под идеальным квадрупольным фильтром масс понимается анализатор, у которого отсутствуют краевые поля, распределение потенциала гиперболическое, время сепарации ионов велико. В этом случае аксептанс КФМ в динамике описывается эллипсами захвата вида [2]

$$\Gamma u^2 + 2Aui + B\dot{u}^2 = \varepsilon = r_0^2/B \max, \quad (1)$$

где ε называют аксептансом, величина которого численно равна площади эллипса, деленного на π ; A, B, Γ — параметры, зависящие от положения рабочей точки a, q на диаграмме стабильности и от фазы $\xi_0 = \omega t_0/2$ влета иона в анализатор; r_0 — круговая частота ВЧ поля; через u, \dot{u} обозначены поперечные координаты (x или y) и соответствующие скорости.

В динамике эллипсы вращаются с частотой ω ВЧ поля и определяют области допустимых значений начальных поперечных координат и скоростей, при которых амплитуда колебаний ионов будет меньше апертуры анализатора r_0 , равной радиусу вписанной окружности между вершинами электродов, $B \max$ — максимальное значение параметра B .

3. Контур 100%-го пропускания на фазовой плоскости u, \dot{u} определяется как граница области допускаемых начальных значений $\{u, \dot{u}\}$, при которых вероятность пропускания идеального анализатора равна единице. Этот контур можно построить по границам эллипсов при различных начальных фазах наложением их друг на друга [1]. Таким способом