

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ. В ВОЛНОВОДЕ НА ЧАСТОТЕ 9300 МГЦ

Г. В. Грозин, Л. Н. Безматерных

С помощью простой методики измерения мощности $P_{пр}$, при которой происходит пробой, исследовалась зависимость $P_{пр}$ от частоты повторения F и длительности импульсов τ . Показано, что $P_{пр}$ не зависит от F и τ . Делается заключение, что время формирования СВЧ-пробоя не превышает 0,4 мксек, а время деионизации разрядного промежутка после пробоя составляет 15–16 мксек.

В имеющейся литературе по СВЧ-пробоям воздуха в волноводе приводятся противоречивые данные о зависимости мощности $P_{пр}$, при которой происходит пробой, от частоты повторения F и длительности импульсов τ . Так, в работе Позина [1] было получено, что $P_{пр}$ зависит от длительности импульса; для импульсов короче 4–5 мксек $P_{пр}$ растет с укорочением импульса, для длительностей $\tau > 5$ мксек $P_{пр}$ от τ не зависит. Согласно [1], $P_{пр}$ зависит также от частоты следования импульсов F : при увеличении F от 500 до 2000 гц $P_{пр}$ уменьшается на 15%. Облучение разрядной полости радиоактивным препаратом также приводит к уменьшению $P_{пр}$. Зависимость $P_{пр}$ от τ объясняется тем, что время формирования импульсного СВЧ-разряда τ_f соизмеримо с длительностью импульса; поэтому для импульсов короче τ_f для пробоя требуется большая мощность, чтобы разряд успел сформироваться к концу импульса.

Зависимость $P_{пр}$ от F может быть вызвана тем, что при увеличении F за время между двумя соседними импульсами не успевает произойти полная деионизация разрядного промежутка; накопление электронов от импульса к импульсу может вызвать пробой при меньшем значении мощности. Аналогичные данные приведены в [5].

Из экспериментальных данных Позина следует, что время формирования СВЧ-разряда составляет величину порядка 4–5 мксек, а время деионизации разрядного промежутка — порядка нескольких мксек.

С другой стороны, в работе [2] указывается, что непосредственные измерения времени формирования СВЧ-разряда в воздухе дали величину, меньшую 1/30 мксек, что противоречит данным Позина. Причиной такого расхождения, по-видимому, является несовершенство методики определения пробивной мощности.

В связи с этим нами было проведено исследование зависимости $P_{пр}$ от τ и F , в котором особое внимание обращалось на точность и объективность в определении $P_{пр}$.

1. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОБИВНОЙ МОЩНОСТИ

Характер пробоя в волноводе при работе в импульсном режиме гораздо сложнее, чем в режиме непрерывной генерации. При повышении мощности в исследуемом на пробой волноводе сначала слыш-

ны отдельные тихие и редкие пробои, затем с ростом мощности их интенсивность и частота возрастают до тех пор, пока отдельные пробои по слуху и свечению не сольются в один сплошной пробой. Поэтому состояние разряда в волноводе характеризуется вероятностью пробоя в импульсе δ , равной $N_{\text{пр}}/N_{\text{им}}$, где $N_{\text{пр}}$ — число пробоев в волноводе за время наблюдения, $N_{\text{им}}$ — общее число импульсов за это же время [9]. При этом за $P_{\text{пр}}$ принимается такая минимальная мощность, при которой $\delta \rightarrow 0$. Методика определения δ в настоящей работе отличается от использованных ранее.

Блок-схема установки приведена на рис. 1а. На этом рисунке: 1 — модулятор, 2 — магнетронный генератор, 3 — испытуемый тракт, 4 — измеритель мощности, 5 — измерительное устройство. Схема измерительного устройства вероятности пробоя показана на рис. 1б.

Вероятность пробоя в импульсе измерялась следующим образом: в середине широкой стенки волновода (см. рис. 1б) просверливалось небольшое отверстие, в которое вставлялся металлический

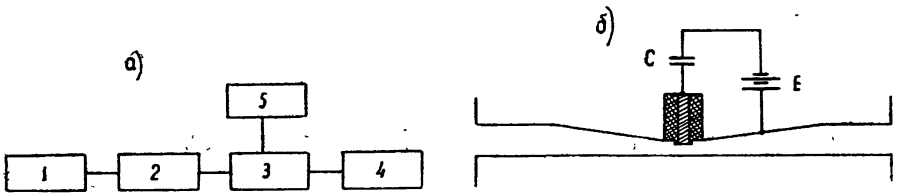


Рис. 1. а) Блок-схема установки; б) схема измерительного устройства.

стержень; боковая поверхность стержня была изолирована от волновода. Стержень немного погружался в волновод (глубина погружения не более 0,5 мм) так, чтобы пробой происходил между стержнем и противоположной стенкой волновода.

Во время пробоя цепь измерительного конденсатора C замыкается, и он оказывается подключенным к источнику постоянного напряжения E . Чем больше пробоев произойдет за интервал наблюдения при постоянной мощности, тем до большего напряжения успеет зарядиться конденсатор C . Следовательно, по напряжению на конденсаторе можно судить о вероятности пробоя в импульсе.

Получим выражение, связывающее δ с напряжением на конденсаторе U_C . Будем считать, что сопротивление промежутка стержень — волновод $R_{\text{пр}}$ остается постоянным с момента начала пробоя до конца импульса, а после окончания импульса изменяется по закону e^{at} :

$$\begin{aligned} R_{\text{пр}} &= r_0; & t_0 \leq t \leq \tau; \\ R_{\text{пр}} &= r_0 e^{at}; & \tau < t < \infty \end{aligned}$$

(t_0 — время, прошедшее от начала импульса до начала разряда).

Для удобства начало отсчета времени будем вести от начала разряда. Пусть напряжение источника питания будет E , тогда

$$E = r_0 C \frac{dU_C}{dt} + U_C; \quad 0 \leq t \leq t_1; \quad (1)$$

$$E = r_0 e^{at} C \frac{dU_C}{dt} + U_C; \quad t_1 < t < \infty. \quad (1')$$

Здесь t_1 — момент окончания импульса.

Решение уравнений (1) и (1') должны быть шиты при $t = t_1$. Учитывая это, из (1) и (1') находим:

$$U_C = E \left(1 - e^{-\frac{t}{r_0 C}} \right); \quad 0 \leq t \leq t_1; \quad (2)$$

$$U_C = E \left\{ 1 - e^{-\frac{1}{r_0 C} \left[t_1 + \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \right]} \right\}; \quad t_1 < t < \infty. \quad (2')$$

Исследование формы импульса тока заряда конденсатора C показало, что время деионизации разрядного промежутка мало (всего 15-16 мксек), а скорость нарастания сопротивления разрядного промежутка после окончания импульса так велика, что заряд конденсатора практически прекращается еще задолго до наступления следующего пробоя. Поэтому членом $e^{-\alpha t}$ в (2') можно пренебречь. Значит в результате одного пробоя конденсатор C зарядится до напряжения

$$U_C = E \left[1 - e^{-\frac{1}{r_0 C} \left(t_1 + \frac{1}{\alpha} \right)} \right]. \quad (3)$$

Если частота повторения импульсов равна F , то за время наблюдения Δt число импульсов, сопровождаемых пробоем, будет равно $F\Delta t$. Тогда напряжение, до которого зарядится конденсатор C за время Δt , определяется по формуле

$$U_C = E \left[1 - e^{-\frac{1}{r_0 C} \left(t_1 + \frac{1}{\alpha} \right) F \Delta t} \right]. \quad (4)$$

Емкость конденсатора C и напряжение источника питания E можно подобрать так, что при нужном интервале наблюдения Δt отношение U_C/E будет много меньше единицы. В этом случае формула (4) упрощается:

$$\ln(1 - U_C/E) = -\frac{1}{r_0 C} (t_1 + 1/\alpha) \Delta t F.$$

Разлагая $\ln(1 - U_C/E)$ по степеням U_C/E и ограничиваясь первым членом, имеем:

$$\delta = \frac{U_C r_0 C}{(t_1 + 1/\alpha) E F \Delta t}. \quad (5)$$

Величину r_0 нетрудно определить на опыте. Для этого нужно в схему рис. 16 ввести последовательно с r_0 дополнительное сопротивление R и измерить U_C с сопротивлением R и без него при одинаковой вероятности пробоя.

По форме осциллограмм тока заряда конденсатора можно найти α . Труднее всего определить величину t_1 , которая зависит от длительности и мощности импульса, а также от интенсивности образования свободных электронов в результате воздействия внешних источников ионизации (космические лучи, радиоактивной излучение земли и др.). Очевидно, что $0 < t_1 < \tau$, причем t_1 имеет наименьшую величину при мощностях, соответствующих вероятности пробоя, близкой к нулю. С увеличением мощности t_1 увеличивается и при достаточно больших значениях δ значение t_1 , по-видимому, мало отличается от τ .

При малых длительностях импульса ($\tau < 1/\alpha$) замена t_1 на τ не внесет больших ошибок. Однако для импульсов $\tau > 1/\alpha$ замена t_1 на τ приведет к тому, что подсчитанные по формуле (5) значения δ будут завышены.

В наших экспериментах с импульсами $\tau = 0,4 \text{--} 6$ мксек, $1/\alpha = 3$ мксек. Так как в конечном счете интерес представляет не значе-

ние вероятности пробоя, а значение мощности, при которой возникает пробой ($\delta \rightarrow 0$), то в формуле (5) во всех случаях вместо t_1 подставлялось время τ .

Чтобы изучить влияние поля вспомогательного источника E (110 в) на процессы развития разряда и устранения заряженных частиц после пробоя, снимались кривые зависимости δ от P для различных значений E . Измерения показали, что δ не зависит от E , т. е. это поле не влияет на процессы, связанные с возникновением пробоя. Оказалось, однако, что оно влияет на деионизацию разрядного промежутка после пробоя. Это влияние уменьшается с уменьшением глубины погружения стержня. Когда стержень погружен не более, чем на 0,5 мм, и имеет положительный потенциал, влияние вспомогательного поля практически не сказывается. В этом положении время деионизации не зависит от величины E при изменении ее от 20 до 110 в.

Время наблюдения Δt (3 ÷ 5 мин) выбирались с таким расчетом, чтобы U_C/E было много меньше единицы. Для $E=110$ в, $\tau=1$ мксек, $F=1000$ гц, $C=1$ мкф и $\delta \approx 10^{-4}$ при $\Delta t=5$ мин $U_C/E=0,05$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Используя описанную выше методику, мы получили зависимости вероятности пробоя в импульсе от мощности для различных частот повторения и длительностей импульсов.

Из рис. 2 видно, что кривые $\delta = f(P)$, снятые при различных частотах повторения, для заданной длительности импульса совпадают между собой. Это значит, что мощность, соответствующая одинаковой вероятности пробоя, не зависит от частоты повторения. Поскольку эти кривые пересекают ось абсцисс в одной точке, пробивная мощность ($\delta = 0$) также не зависит от E .

Характер кривых $\delta = f(P)$, снятых при одной частоте повторения, но разных длительностях импульса, иной (рис. 3). С увеличе-

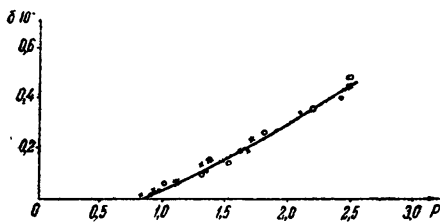


Рис. 2. Зависимость вероятности пробоя δ от мощности P ($\tau = 1$ мксек; $\ast F = 100$ гц, $\cdot F = 600$ гц, $+ F = 1000$ гц, $\circ F = 2000$ гц; P в условных единицах).

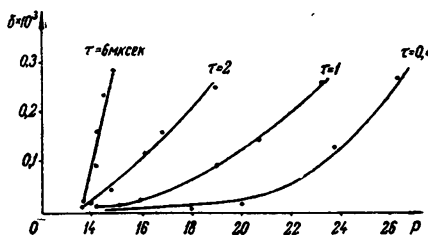


Рис. 3. Зависимость вероятности пробоя δ от мощности P ($F = 600$ гц, P в условных единицах).

нием длительности импульса кривые идут круче, но все они пересекаются с осью абсцисс в одной точке. Следовательно, $P_{пр}$ не зависит от длительности импульса вплоть до $\tau = 0,4$ мксек.

Мощность же, соответствующая данной отличной от нуля вероятности пробоя, зависит от длительности импульса.

Из проведенных измерений можно заключить, что время формирования СВЧ разряда не превосходит 0,4 мксек.

Осциллографические наблюдения импульсов тока заряда конденсатора показали, что время деионизации разрядного промежутка после пробоя равно 15 ÷ 16 мксек, т. е. значительно меньше периода следования импульсов. Поэтому вполне естественно, что в наших измерениях $P_{пр}$ не зависит от E . Полученное же в [1] уменьшение

пробивной мощности с ростом F объясняется, скорее всего, тем, что при разных частотах повторения за $P_{\text{пр}}$ принималась мощность, соответствующая различным состояниям разряда в волноводе (разным значениям вероятности пробоя в импульсе).

Действительно, в статье [1] пробой фиксировался на слух по минимальному числу пробоев за время наблюдения. Поскольку при разных частотах повторения минимальное число пробоев, при котором фиксировалась мощность, оставалось примерно одинаковым, с ростом F фиксировался пробой с меньшей величиной δ ; поэтому в [1] и получилась зависимость $P_{\text{пр}}$ от E . То же самое можно сказать и о причине появления зависимости $P_{\text{пр}}$ от τ .

В последней работе по пробую воздуха на СВЧ [4] приводятся данные о зависимости $P_{\text{пр}}$ от E и τ . Авторы использовали сложную методику определения δ . Они могли фиксировать пробой с вероятностью $\delta < 10^{-3}$ и при этом нашли, что $P_{\text{пр}}$ при атмосферном давлении не зависит от E , но зависит от τ . Это объясняется тем, что в [4] фиксировался пробой с вероятностью, не равной нулю.

Таким образом, пробивная мощность в волноводе на частоте 9300 *мгц* не зависит от частоты повторения импульсов в диапазоне 100 ÷ 2000 *гц* и от длительности импульса в интервале от 0,4 *мксек* до 6 *мксек*. Время деионизации разрядного промежутка после пробоя порядка 15 ÷ 16 *мксек*; время формирования СВЧ-разряда в волноводе при атмосферном давлении — меньше 0,4 *мксек*.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Q. Posin, Phys. Rev., 73, 496 (1948).
2. W. A. Prowse, Proc. IEE, P. 4, 99 (1952).
3. R. Cooper, Proc. IEE, P. 3, 94, 315 (1947).
4. L. Gould, L. W. Roberts, J. Appl. Phys., 27, 1162 (1956).
5. Линии передачи сантиметровых волн, 1, изд. Сов. радио, М., 1951, 239.

Сибирский физико-технический институт
при Томском университете

Поступила в редакцию
24 сентября 1957 г.