

04;11;12

Влияние длительности фронта импульса на электрическую прочность вакуумного промежутка

© А.А. Емельянов, Е.А. Емельянова

Орловский государственный технический университет,
302020 Орел, Россия
e-mail: emel@ostu.ru

(Поступило в Редакцию 31 января 2006 г.
В окончательной редакции 14 июня 2006 г.)

Рассмотрены оптимальные режимы кондиционирования электродов в вакууме импульсами напряжения разной формы. Показано, что в наносекундном диапазоне при $t_p = \text{const}$ импульсная электрическая прочность для косоугольной волны напряжения более чем в 4 раза выше прочности для прямоугольного импульса с бесконечно коротким фронтом. Получены зависимости электрической прочности от длительности кондиционирующих импульсов с разной скоростью нарастания напряжения в диапазоне $10^{-10} < t_p < 10^{-3}$ s. Электрическая прочность увеличивается от $2 \cdot 10^7$ в микросекундном диапазоне до 10^{10} V/m в субнаносекундном диапазоне длительностей.

PACS: 52.80.Vp

Введение

Исследования электрической прочности вакуумной изоляции выполняют в полях разной степени неоднородности при различных межэлектродных расстояниях, воздействуя на электроды высоковольтными импульсами разной формы при различных соотношениях параметров импульса и создавая на промежутке перенапряжения разной степени. Из-за различия условий проведения экспериментов результаты отдельных исследований, как правило, соответствующих небольшому диапазону длительностей, плохо согласуются друг с другом, не позволяя построить единую зависимость электрической прочности $E_0(t_p)$ от длительности кондиционирующего импульса.

Одной из основных причин, приводящих к большому расхождению известных экспериментальных данных по электрической прочности вакуумной изоляции, является степень перенапряжения, использованная при импульсной обработке электродов. Электрическая прочность меняется с изменением перенапряжения на промежутке. Уменьшение перенапряжения при кондиционировании повышает электрическую прочность. При прочих равных условиях для импульсов напряжения заданной формы и длительности максимальная электрическая прочность достигается в результате оптимизации режима кондиционирования путем регулирования амплитуды импульсов. Оптимальный режим, максимально повышающий качество поверхности катода и электрическую прочность, соответствует применению высоковольтных импульсов, длительность которых равна времени запаздывания вакуумного пробоя $t_p = t_d$.

С целью получения единых зависимостей электрической прочности вакуумной изоляции от длительности кондиционирующих импульсов проанализированы известные теоретические и экспериментальные результаты

по времени запаздывания пробоя на импульсах разной формы в диапазоне $10^{-10} < t_p < 10^{-3}$ s.

Прямоугольный импульс с бесконечно коротким фронтом

При заданной длительности $t_p = \text{const}$ истинное значение электрической прочности соответствует прямоугольному импульсу напряжения с бесконечно коротким фронтом $t_{le} \ll t_p$. На основании экспериментальных данных и джоулева механизма инициирования в [1] получено аналитическое выражение, представляющее время запаздывания пробоя как функцию электрической прочности и физических постоянных материала катода

$$t_d = 1.57 \cdot 10^{-25} a \rho c \kappa_0^{-1} \varphi^2 e^{-21.6/\sqrt{\varphi}} E_0^{-0.4} \times \exp\{10.3 \varphi^{3/2} E_0^{-0.1}\}, \quad (1)$$

где a , ρ , c , κ_0 , φ — величина, определяемая критической температурой и медленно изменяющаяся с напряженностью электрического поля; плотность; удельная теплоемкость; коэффициент пропорциональности в зависимости удельного сопротивления от температуры; работа выхода материала эмиттера, соответственно.

В научной литературе экспериментальные данные по запаздыванию пробоя наиболее полно представлены для вакуумных промежутков, образованных медными электродами [2–6]. С помощью выражения (1) и известных экспериментальных результатов нами построены зависимости $E_0(t_p)$ для медных электродов, соответствующие кондиционированию прямоугольными импульсами идеальной формы длительностью $t_p = t_d$. Расчетная (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) зависимости электрической прочности от длительности импульсов

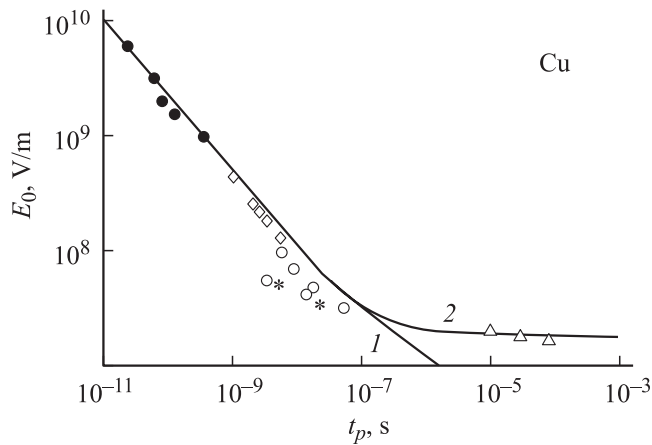


Рис. 1. Электрическая прочность в зависимости от длительности $t_p = t_d$ прямоугольных импульсов с бесконечно коротким фронтом: \triangle — [2]; \bullet — [3]; \square — [4]; \circ — [5]; $*$ — [6].

оптимального режима кондиционирования приведены на рис. 1.

Из приведенных кривых $E_0(t_p)$ следует, что расчетная кривая совпадает с экспериментальной в диапазоне $10^{-11} \leq t_p \leq 10^{-7}$ s, т.е. выражение (1), полученное в пренебрежении теплопроводностью, справедливо при импульсах малой длительности $t_p \leq 10^{-7}$ s.

При больших длительностях $t_p > 10^{-7}$ s пренебрежение теплопроводностью недопустимо, так как приводит к расхождению расчета и эксперимента. Электрическая прочность в микро- и миллисекундном диапазонах при $t_p \geq 10^{-6}$ s практически не зависит от длительности импульса и для прямоугольного импульса составляет $E_0 \approx 2 \cdot 10^7$ V/m, что связано с охлаждением эмиттера теплопроводностью.

При $t_p < 10^{-6}$ s прочность растет с уменьшением длительности до $E_0 = 10^{10}$ V/m при $t_p = 10^{-11}$ s. При $t_p \leq 10^{-7}$ s изменение электрической прочности с длительностью импульса определено джоулевым нагревом микроэмиттера. В промежуточном интервале длительностей $10^{-7} < t_p < 10^{-6}$ s прочность определяется совместным действием как джоулева нагрева микроэмиттера, так и его охлаждения теплопроводностью. Электрическая прочность, полученная в работах [5,6] на импульсах длительностью $t_p \sim 10^{-8}$ s, ниже значения, соответствующего оптимальному режиму. Это связано с тем, что эксперименты по времени запаздывания были выполнены с применением перенапряжения. Перенапряжение, снижая электрическую прочность, позволяло исследовать не только запаздывание пробоя, но и коммутационные процессы в промежутке.

Представленная на рис. 1 зависимость $E_0(t_p)$ (кривая 2) может быть использована для оценки электрической прочности на импульсах с конечной скоростью нарастания напряжения, соответствующих оптимальному режиму кондиционирования в диапазоне длительностей $10^{-11} \leq t_p \leq 10^{-3}$ s.

Импульсы с конечной скоростью нарастания напряжения

Экспериментальные данные по времени запаздывания пробоя получают при различных соотношениях длительностей t_p импульса и t_{le} фронта. Результаты, полученные на фронте импульса $t_p = t_{le}$, соответствуют воздействию косоугольной волны напряжения. Электрическая прочность зависит от скорости нарастания напряжения на промежутке, уменьшаясь с ее ростом, поэтому прочность для косоугольной волны превосходит прочность для идеального прямоугольного импульса. При длительностях импульса $t_p \sim t_{le}$, соизмеримых с длительностью фронта, электрическая прочность занимает промежуточное положение между прочностями для косоугольного и прямоугольного импульсов напряжения.

Учитывая обоснованность применения джоулева механизма иницирования пробоя при малых длительностях $t_p \leq 10^{-7}$ s, прочность на импульсах с конечной скоростью нарастания напряжения можно оценить с помощью соотношений, выражающих время запаздывания t_{d1} для прямоугольного импульса с конечным фронтом и t_{d2} для косоугольной волны напряжения через время запаздывания t_d для идеального прямоугольного импульса [1]:

$$t_{d1} = t_d + t_{le}(1 - 0.097\varphi^{-3/2}E_0^{0.1}), \quad (2)$$

$$t_{d2} = 10.3\varphi^{3/2}E_0^{-0.1}t_d. \quad (3)$$

Соотношения (2) и (3) получены в пренебрежении теплопроводностью и справедливы при $t_p \leq 10^{-7}$ s.

Зависимости времени запаздывания пробоя в вакууме от напряженности электрического поля для медных электродов, построенные с помощью выражений (1)–(3), представлены на рис. 2.

Из кривых $t_d(E_0)$ следует, что при неизменной длительности $t_d = \text{const}$ электрическая прочность для пря-

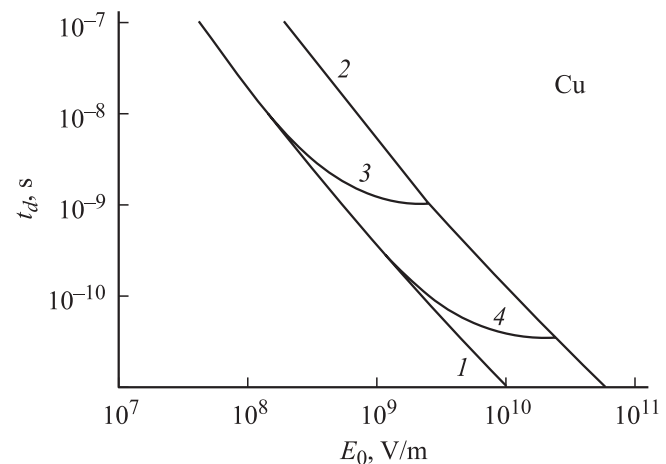


Рис. 2. Время запаздывания пробоя как функция напряженности электрического поля для импульсов разной формы: прямоугольный с бесконечно коротким фронтом ($t_{le} = 0$) — 1; косоугольный — 2; прямоугольный с фронтом: $t_{le} = 1$ — 3; 0.03 ns — 4.

моугольного импульса с бесконечно коротким фронтом (кривая 1) в ~ 4 раза меньше прочности для косоугольной волны напряжения (кривая 2). При $t_p \sim t_{le}$, соизмеримых с фронтом, прочность возрастает по мере приближения длительности импульса к длительности фронта (кривые 3, 4). Электрическая прочность для прямоугольного импульса с меньшей скоростью нарастания напряжения (кривая 3) превосходит прочность для импульса с большей (кривая 4).

При $E_0 = \text{const}$ запаздывание t_{d2} для косоугольной волны превышает запаздывание t_d для идеального прямоугольного импульса на порядок величины. Запаздывание t_{d1} для прямоугольного импульса с конечной скоростью нарастания напряжения занимает промежуточное положение $t_d \leq t_{d1} \leq t_{d2}$, являясь функцией отношения длительностей t_{le}/t_d .

Представленные на рис. 2 зависимости $t_d(E_0)$ соответствуют максимальной электрической прочности, которая может быть достигнута в результате оптимальных режимов, кондиционирования импульсами $t_p = t_d$. Однако расчеты, выполненные в пренебрежении теплопроводностью, справедливы при $t_p \leq 10^{-7}$ s и не могут быть использованы для импульсов большей длительности.

Ограничение импульсами наносекундного диапазона сужает круг задач по оценке прочностных характеристик вакуумной изоляции. С целью построения зависимостей $E_0(t_p)$, охватывающих более широкий диапазон длительностей импульсов, проанализированы известные экспериментальные данные по запаздыванию пробоя на импульсах напряжения косоугольной и прямоугольной формы. Результаты получены для электродов из нержавеющей стали [7] и меди при $10^{-6} \leq t_p \leq 10^{-3}$ s. Эксперименты с медными электродами выполнены на установке [8].

При $t_p = \text{const}$ пробивное напряжение U_1 для импульса с конечной скоростью нарастания напряжения превышает напряжение пробоя U_0 для идеального прямоугольного импульса. Кратность превышения является функцией длительности t_p и может быть оценена коэффициентом формы импульса

$$K_f = U_1/U_0. \quad (4)$$

Зависимость коэффициента формы от длительности импульса для косоугольной волны напряжения приведена на рис. 3. Кривая $K_f(t_p)$ объединяет расчетную зависимость для импульсов малой длительности $t_p \leq 10^{-7}$ s, полученную с помощью выражений (1) и (3), с экспериментальной для импульсов $10^{-6} \leq t_p \leq 10^{-3}$ s. При больших длительностях $t_p > 10^{-6}$ s влияние формы импульса на напряжение пробоя незначительно. Коэффициент формы мал $K_f \leq 1.4$ и уменьшается с ростом длительности импульса. Слабая зависимость электрической прочности от скорости нарастания напряжения в промежутке объясняется охлаждением эмиттера теплопроводностью. Совпадение экспериментальных результатов для микросекундного диапазона, полученных в

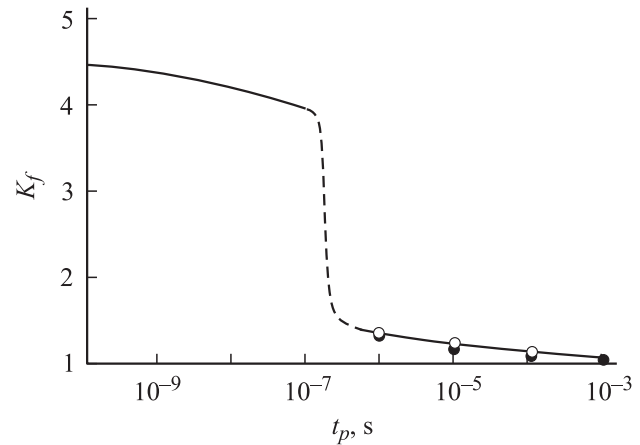


Рис. 3. Коэффициент формы для косоугольной волны напряжения как функция длительности; эксперимент: ● — Fe; ○ — Cu.

сантиметровых промежутках на медных и стальных электродах, указывает на независимость коэффициента формы импульса от материала электродов.

При $t_p < 10^{-7}$ s влияние формы импульса на электрическую прочность существенно $K_f \geq 4$ и возрастает с уменьшением длительности. В этом случае температура эмиттера и электрическая прочность определены джоулевым нагревом и зависят от скорости нарастания напряжения. В переходном диапазоне $10^{-7} \leq t_p \leq 10^{-6}$ s и джоулев нагрев, и охлаждение теплопроводностью определяют температуру эмиттера и влияние скорости нарастания напряжения на электрическую прочность.

Кривая $K_f(t_p)$ характеризует относительное превышение электрической прочности в результате перехода от прямоугольного импульса с бесконечно коротким фронтом к косоугольной волне. С помощью кривой $K_f(t_p)$ можно построить зависимость электрической прочности на косоугольной волне напряжения от длительности импульса, используя представленную на рис. 1 (кривая 2) зависимость $E_0(t_p)$ для идеального прямоугольного импульса.

Электрическая прочность, соответствующая оптимальным режимам кондиционирования медных электродов импульсами с разной скоростью нарастания напряжения как функция длительности импульсов приведена на рис. 4.

Кривая 1 для идеального прямоугольного импульса являлась основой при построении кривых 2–4 с разными скоростями нарастания напряжения. Зависимость $E_0(t_p)$ для косоугольной волны (кривая 2) построена с учетом кривой коэффициента формы импульса $K_f(t_p)$, приведенной на рис. 3. Зависимости для прямоугольных импульсов с разными скоростями нарастания напряжения (кривые 3, 4) построены с помощью соотношения (2).

Расчетная зависимость (кривая 4) практически точно подтверждается результатами эксперимента [3], выполненного в микронных зазорах для субнаносе-

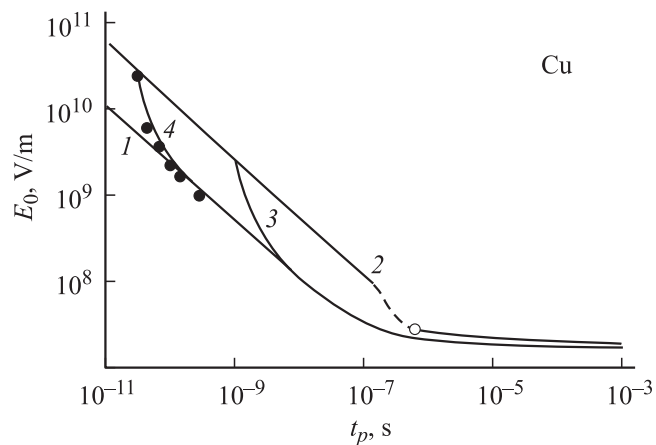


Рис. 4. Электрическая прочность как функция длительности $t_p = t_d$ для прямоугольных импульсов: $t_{le} = 0$ — 1; 1 — 3; 0.03 ns — 4; косоугольной волны напряжения — 2; эксперимент: ● — [3]; ○ — [9].

кундного диапазона длительностей $t_p = t_d$. Скорость нарастания напряженности в экспериментах составила $dE_0/dt = 9 \cdot 10^{20}$ V/(ms), а электрическая прочность достигла $E_0 \approx 2.7 \cdot 10^{10}$ V/m. Электрическая прочность $E_0 \approx 3.5 \cdot 10^7$ V/m [9], полученная в результате оптимальных режимов кондиционирования косоугольными импульсами длительностью $t_p = 0.5 \mu\text{s}$ в сантиметровых промежутках с много меньшей скоростью нарастания напряженности электрического поля $dE_0/dt = 7 \cdot 10^{15}$ V/(ms), также подтверждает справедливость приведенных зависимостей $E_0(t_p)$.

Заключение

На основании джоулева механизма инициирования и известных экспериментальных данных по времени запаздывания пробоя в вакууме, соответствующих оптимальным режимам кондиционирования импульсами $t_p = t_d$, получены зависимости максимально электрической прочности $E_0(t_p)$ от длительности импульсов с разными скоростями нарастания напряжения. Приведенные кривые $E_0(t_p)$ подтверждаются известными экспериментальными данными, полученными в результате оптимальных режимов кондиционирования прямоугольными импульсами субнаносекундной длительности и косоугольной волной напряжения $t_p = 0.5 \mu\text{s}$.

В наносекундном диапазоне при $t_p = \text{const}$ электрическая прочность для косоугольной волны напряжения превышает прочность для прямоугольного импульса с бесконечно коротким фронтом в 4 раза. Кратность превышения увеличивается с уменьшением длительности. При $t_p \sim t_{le}$, соизмеримых с длительностью фронта, электрическая прочность возрастает по мере приближения длительности импульса к длительности фронта до значения, соответствующего косоугольной волне напряжения $t_p = t_{le}$. При $E_0 = \text{const}$ запаздывание t_{d2}

для косоугольной волны превышает запаздывание t_d для идеального прямоугольного импульса на порядок величины.

При длительностях $t_p > 10^{-6}$ s электрическая прочность слабо зависит от скорости нарастания напряжения и составляет $E_0 \approx 2 \cdot 10^7$ V/m. С уменьшением длительности прочность возрастает, достигая $E_0 \approx 2.7 \cdot 10^{10}$ V/m для косоугольной волны напряжения длительностью $t_{le} = 0.03$ ns и $E_0 = 10^{10}$ V/m при $t_p \approx 10^{-11}$ s для прямоугольного импульса с бесконечно коротким фронтом.

Полученные кривые $E_0(t_p)$ могут быть использованы для расчета напряжения пробоя как функции межэлектродного расстояния $U_{br}(d)$, соответствующего оптимальным режимам импульсного кондиционирования и характеризующего максимальную электрическую прочность.

Список литературы

- [1] Емельянов А.А. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 9. С. 113–119.
- [2] Каляцкий И.И., Кассиров Г.М., Смирнов Г.В. и др. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 7. С. 1547–1550.
- [3] Jüttner B., Rohrbeck W., Wolff H. // Proc. IXth Int. Conf. Phen. Ion. Gas. Bucharest, 1969. P. 140.
- [4] Месяц Г.А., Бугаев С.П., Проскуровский Д.И. и др. // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14. № 12. С. 2222–2230.
- [5] Кассиров Г.М. // ЖТФ. 1966. Т. 36. Вып. 10. С. 1883–1885.
- [6] Вавилов С.П., Месяц Г.А. // Изв. вузов. Физика. 1970. № 8. С. 90–94.
- [7] Олендзкая Н.Ф., Сальман М.А. // ЖТФ. 1970. Т. 40. Вып. 2. С. 333–337.
- [8] Каляцкий И.И., Кассиров Г.М., Смирнов Г.В. // ПТЭ. 1974. № 4. С. 84–86.
- [9] Емельянов А.А., Сафонова Т.Н., Емельянова Е.А. // Докл. 3-й МНПК „Электронные средства и системы управления“. Томск: ИОА СО РАН, 2005. Ч. 1. С. 195–197.