

МЕТОД РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОБОЯ ГАЗОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ АППАРАТУРЕ СУБМЕГАВОЛЬТНОГО ДИАПАЗОНА

Дубовенко К.В., к.т.н.

Николаевский учебно-научный институт Одесского Национального университета им. И.И. Мечникова
Украина, 54010, Николаев, ул. Мореходная 2а, НУНИ ОНУ им. И.И. Мечникова,
кафедра "Вычислительная техника и информационные технологии"
тел. (0512) 34-60-15, факс (0512) 50-03-83, e-mail: ppps@mksat.net

З урахуванням сукупності механізмів ініціювання початкових електронів розширено можливості застосування чисельного метода визначення імовірнісних характеристик пробоя газової ізоляції у пристроях високовольтної апаратури з високою напруженістю електричного поля (> 5 МВ/м). З використанням метода розраховано характеристики газової ізоляції у реальних компактних конструкціях малоіндуктивного розрядника та субмегавольтного генератора імпульсних напруг.

С учетом совокупности механизмов иницирования начальных электронов расширены возможности применения численного метода определения вероятностных характеристик пробоя газовой изоляции в устройствах высоковольтной аппаратуры с высокой напряженностью электрического поля (> 5 МВ/м). С использованием метода рассчитаны характеристики газовой изоляции в реальных компактных конструкциях малоиндуктивного разрядника и субмегавольтного генератора импульсных напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Создание компактных высоковольтных установок и аппаратов с максимально допустимыми удельными характеристиками приводит к необходимости повышения напряженности электрического поля в узлах оборудования до значений, превышающих 5 МВ/м. Это особенно актуально для устройств с рабочими напряжениями выше 100 кВ, многоступенчатых систем умножения напряжения до значений мегавольтного уровня. В условиях, когда для функционирования рабочего узла установки необходим вакуум (транспортировка электронных и ионных пучков, лазерного луча), целесообразно применение вакуумной изоляции высоковольтного оборудования в единой системе вакуумирования его объема [1, 2]. В технологических установках, предназначенных для генерации разрядов в сплошных средах, часто целесообразно использование газовой изоляции. Однако известно [3], что для развития газового разряда, в отличие от вакуумного пробоя, может оказаться достаточным лишь одного начального электрона, чтобы вызвать ионизационные явления. В этой связи разработка методов расчета характеристик электрической прочности газовой изоляции является актуальной задачей. В работе [4] рассмотрен метод расчета вероятностных характеристик пробоя газовой изоляции (вероятности пробоя в зависимости от напряжения, напряжения пробоя, электрической прочности, разброса пробивных напряжений). В нем учтены неравномерность распределения электрического поля, вызванная конфигурацией разнотенциальных поверхностей высоковольтной конструкции, шероховатость поверхности электродов, развитие ионизационных процессов, электрофизические свойства рабочего газа и материала электродов. Применение метода для разработки высоковольтной коммутационной аппаратуры [4 - 6] показало согласие расчетов с экспериментальными результатами в полях с напряженностью < 5 МВ/м.

Целью данной работы является совершенствование метода расчета вероятностных характеристик пробоя газовой изоляции в полях более высокой напряженности, характерных для работы установок и аппаратуры субмегавольтного диапазона.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА

Численное моделирование характеристик электростатического поля в высоковольтных устройствах в соответствии с методом выполняется в двумерном конечно-разностном приближении с использованием численного метода верхней релаксации [7] и кода [2], специально разработанного для решения внутренней краевой проблемы с учетом конструкции устройства с осевой симметрией и соответствующих условий на его границах.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

$$E = -grad \varphi = - \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} + z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right). \quad (2)$$

Здесь r, z – радиальная и аксиальная координата, соответственно; φ – электрический потенциал; ε – диэлектрическая проницаемость; E – напряженность электрического поля.

Шероховатость поверхности электродов приводит к усилению электрического поля вблизи микровыступов. Она определяется характеристикой $f(h)$, которая рассчитывается по результатам измерений всех микровыступов на контрольных участках поверхности электрода после ее обработки и кондиционирования [4]. Полученные данные экстраполируются на всю площадь этой поверхности S_0 , так что $f(h) = S_h / S_0$, где S_h – площадь, которую занимают микровыступы с высотой, большей, чем h . Так, при $h = 0$ значение S_h равняется S_0 и $f(h) = 1$. Аналогично при $h > h_m$, (где h_m – максимальная высота микровыступов) значение S_h равняется 0, тогда $f(h) = 0$. Усиле-

ние электрического поля вдоль оси микровыступа высотой h_B учтено соотношением, полученным при аппроксимации его формы полуэллипсоидом [1]

$$E(h) = E \left[\left(1 - \frac{\operatorname{arth}(c/h) - c/h}{\operatorname{arth}(c/h_B) - c/h_B} \right) + \frac{1}{(\operatorname{arth}(c/h_B) - c/h_B)(h^2/c^2 - 1)h/c} \right] = E \cdot \mu, \quad (3)$$

где c - половина расстояния между фокусами эллипсоида; μ - коэффициент усиления поля.

В соответствии с численным методом рабочая поверхность с заданным потенциалом (электрод) площадью S_0 разделяется на N участков каждая с площадью S_j ($j = 1 \dots N$). Площадь участков мала настолько, что напряженность электрического поля в пределах каждого из них можно считать неизменной. При этом должно выполняться соотношение

$$\sum_{j=1}^N S_j = S_0. \quad (4)$$

Тогда вероятность пробоя, развивающегося с j -го участка при напряжении U за промежуток времени dt , может быть определена выражением

$$dQ_j(U, t) = dW_j(t) \cdot q_j(U), \quad (5)$$

где $dW_j(t)$ - вероятность появления электрона возле j -го участка высокопотенциального электрода; $q_j(U)$ - вероятность пробоя в равномерном поле в результате появления электрона возле S_j участка.

Первичная электронная лавина может образоваться в межэлектродном промежутке только за счет начальных электронов, которые находятся в его области непосредственно в момент подачи на него напряжения. Среднее количество свободных электронов, возникающих в единице объема газа в единицу времени за счет естественной радиации, составляет $n_0 \approx 10^{12} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ [3]. При напряженностях поля $E \leq 5 \text{ МВ/м}$ этот механизм генерации электронов на кондиционированных электродах является основным. В работе [4] показано, что применение метода расчета вероятностных характеристик пробоя приводит к расхождению с экспериментальными данными при значениях напряжения близких напряжению прочности газовой изоляции. Там же выполнена количественная оценка таких расхождений. Анализ экспериментальных данных и их теоретических обобщений, представленный в [8], свидетельствует о том, что взаимодействие материала электродов с газовой средой во время разряда приводит к возникновению других механизмов иницирования начальных электронов. Так, на кондиционированных электродах в полях с напряженностью $E > 30 \text{ МВ/м}$ преобладает эффект автоэмиссии электронов с микроострий электродной поверхности. При этом наблюдается тенденция совпадения кривых зависимостей тока эмиссии от напряженности поля при различных давлениях и частотах и более крутой рост тока в зависимости от напряженности электрического поля [8]. Плотность тока автоэлектронной эмиссии определяется соотношениями [8]

$$j_{et} = j_e \left(\frac{\pi T}{2T_{inv}} / \sin \frac{\pi T}{2T_{inv}} \right), \quad (6)$$

$$T_{inv} = \frac{eh_p}{8\pi(2m)^{0.5}t(y)k} \cdot \frac{E}{\Psi^{0.5}}, \quad (7)$$

$$j_e = \frac{e^3}{8\pi h_p} \left[\frac{E_\mu^2}{t(y)^2} \right] \cdot \frac{E_\mu^2}{\Psi} \cdot \exp \left(- \frac{8\pi(2m)^{0.5}}{3eh_p} \cdot \frac{\Psi^{1.5}}{E_\mu} \Theta(y) \right), \quad (8)$$

$$y = (e^3 E_\mu)^{0.5} / \Psi, \quad (9)$$

где j_e, j_{et} - плотности тока эмиссии при абсолютном нуле и температуре T эмитирующей поверхности соответственно; T_{inv} - температура инверсии; h_p - постоянная Планка; k - постоянная Больцмана; $E_\mu = E \cdot \mu$ - напряженность электрического поля в точке, где возникает автоэлектронная эмиссия; e - заряд электрона; Ψ - работа выхода электрона из металла; $\Theta(y)$ - функция Нордгейма.

Тогда количество электронов, эмитированных с микровыступов рабочей поверхности за единицу времени равно

$$N_e = \frac{1}{e} \int_0^{S_0} j_{et} dS_h = \frac{S_0}{e} \int_{h>h_m} j_{et} f'(h) dh. \quad (10)$$

Объем межэлектродного промежутка равен

$$V = \sum_{j=1}^N V_j = \sum_{j=1}^N S_j h_j, \quad (11)$$

где V_j - элементарный объем межэлектродного промежутка; h_j - кратчайшее расстояние между электродами в пределах элементарных участков S_j . Тогда количество электронов, образовавшихся в единице объема в единицу времени равно

$$n_e = N_e / V. \quad (12)$$

Причем, из подтвержденной экспериментально теории Фаулера-Нордгейма известно [8], что функция вида

$$\ln(n_e / E^2) = f(1/E) \quad (13)$$

является прямой линией.

При напряженности $E < 30 \text{ МВ/м}$ электронный ток с микроострий резко снижается и в диапазоне $5 \leq E \leq 30 \text{ МВ/м}$ существенными оказываются иные механизмы образования начальных электронов. Так, образование на катоде диэлектрических пленок оксидов, нитридов и т.д. и вкраплений в виде сжиженных соединений веществ приводит к эмиссии электронов с катода сквозь них в область межэлектродного промежутка. Причиной этого эффекта является образование на поверхности диэлектрика избыточного положительного заряда при бомбардировке катода электронами, облучении, оседании ионов на пленку. Еще одним механизмом иницирования электронов является адсорбция газов на поверхности электродов. Этот механизм проявляется двояко. С одной стороны адсорбированные слои приводят к изменению (повышению или понижению в зависимости от состава газа) работы выхода материала электрода. С другой стороны, присутствие отрицательных ионов может вызвать иницирование разряда вследствие их десорбции с

катодной поверхности или в результате отрыва электрона от отрицательного иона. Эти механизмы образования начальных электронов действуют одновременно. При этом на значение тока электронов влияние оказывают состав газа, частота повторения импульсов, давление. Анализ экспериментальных данных ряда работ, представленный в [8] показал, что и в диапазоне значений $5 \leq E \leq 30$ МВ/м зависимость (13) также является прямой линией, но имеет другой наклон. Это позволяет аппроксимировать зависимость (13) прямой между асимптотическими значениями $n_e = n_0$ при $E_1 \approx 5$ МВ/м и n_e , рассчитанному с использованием соотношений (6)–(12) для $E_2 \approx 30$ МВ/м. Влияние частоты повторения импульсов F и давления газа p учитывается умножением значений n_e для $E_1 \leq E \leq E_2$ на коэффициент, полученный в данной работе обработкой экспериментальных данных для $F = 10 \dots 30$ Гц, $p = 0.05 \dots 0,5$ МПа

$$k = \left[(aF^Z + 0,25b) \cdot \frac{1}{(p/0,1)^{0,4}} \right]^{\frac{1}{0,5(E-E_1)+1}} \quad (14)$$

Для воздуха, например, $a = 0,04$; $b = 0,25$; $Z = 1,4$.

В выражениях (7)–(9) учтено определенное в [8] на основании экспериментальных данных увеличение работы выхода Ψ в электроотрицательных газах.

В объеме, заполненном электроотрицательным газом, из-за эффекта прилипания количество начальных электронов меньше в g раз [3]. Значение коэффициента $g(E/p)$ зависит от соотношения коэффициентов ионизации $\alpha(E/p)$ и прилипания $\eta(E/p)$

$$g(E/p) = [\alpha(E/p) - \eta(E/p)] / \alpha(E/p), \text{ если } \alpha > \eta, \quad (15)$$

$$g(E/p) = 0, \text{ если } \alpha \leq \eta.$$

Усиление электрического поля у микровыступа означает, что при подъеме напряжения электронная лавина может образоваться лишь из области, которая прилегает к нему, и высота этой зоны увеличивается с увеличением напряжения. Потому общее количество эффективных электронов, появляющихся в пределах участка S_j в единицу времени и которые могут привести к образованию лавины, вычисляется интегрированием по h_j

$$N_j = (n_0 + n_e) \cdot S_j \int_0^{h_j} g_j dh. \quad (16)$$

Тогда вероятность появления эффективного электрона в пределах участка за время dt будет равна

$$dW_j = N_j dt = (n_0 + n_e) \cdot S_j \int_0^{h_j} g_j dh \cdot dt. \quad (17)$$

Для анализа вероятности пробоя необходимо привлечь критерий пробоя, полученный на основе детерминированной модели анализа физических процессов. В данном случае учтена возможность реализации пробоя в соответствии с таунсендовским и стримерным механизмами [3]:

$$\int_0^d (\alpha_j(x) - \eta_j(x)) dx \geq \ln \left(\frac{\alpha(d) - \eta(d)}{\alpha(d) \cdot \gamma} \right) = K, \quad (18)$$

$$\int_0^d (\alpha_j(x) - \eta_j(x)) dx \geq \ln N_{кр} = K_c. \quad (19)$$

Здесь d – длина пути лавины между электродами; x – расстояние, которое прошла лавина в поле; γ – второй ионизационный коэффициент Таунсенда; K – константа, которая для разных материалов электродов и газов находится в диапазоне $3 \leq K \leq 9$. Аналогично, $K_c = \ln(N_{кр}) = 13,8 \dots 18,5$.

Как показано в [4], для анализа вероятностных характеристик пробоя в сильнонеоднородных полях может оказаться целесообразным применение и других детерминированных критериев пробоя, например, полученных на основе решения численной модели пробоя в диффузионно-дрейфовом приближении, с использованием теорий Лозанского и Фирсова, Даусона и Вина. Преимущества и недостатки детерминированных теорий пробоя рассмотрены в [9]. Применение того или иного критерия не влияет на суть метода расчета вероятностных характеристик пробоя в газах, но может повлиять на точность результатов в сильнонеоднородных полях, например, когда в сильном поле между электродами присутствует или возникает область с напряженностью, недостаточной для ионизации электронным ударом.

Если при заданном напряжении распределение электрического поля с учетом его усиления в окрестности микровыступов высотой h таково, что соотношение (18) не выполняется, вероятность развития пробоя с этого участка равна нулю, то есть

$$q_j(U) = 0. \quad (20)$$

Однако в то же время значение $q_j(U)$ может быть отличным от нуля для других участков, где напряженность неоднородного поля выше при той же величине напряжения.

Вероятность пробоя q_j , развивающегося с S_j участка электродной поверхности, может быть вычислена с учетом следующих соображений. При появлении свободного электрона возле поверхности электрода вероятность того, что он окажется именно возле участка S_j , равна отношению S_j/S_0 . Но процесс образования лавины этим электроном может привести к пробоя только тогда, когда электрон будет возле микровыступа с высотой больше h_{min} , при которой выполняются условия пробоя.

Общая площадь микровыступов участка j с высотой, большей чем h_{min} определяется выражениями характеристики шероховатости электродов $f(h)$. Это значит, что

$$q_j(U) = f(h) = \frac{S_{hmin}}{S_0}. \quad (21)$$

Таким образом, значение $dQ_j(U)$ в (5) рассчитывается в ячейках разностной сетки как

$$dQ_j(U) = dW_j \cdot q_j(U) = (n_0 + n_e) \cdot S_j \int_0^{h_j} g_j dh \cdot q_j(U) dt. \quad (22)$$

Тогда в дифференциальном виде соотношение вероятности пробоя для всего устройства может быть записано в виде

$$dQ(U,t) = (n_0 + n_e) \cdot \sum_{j=1}^N S_j \int_0^{h_j} g_j dh \cdot q_j(U) dt. \quad (23)$$

Если устройство испытывается k_0 раз при напряжении U и к моменту t каждого испытания развитие пробоя с участка S_j состоялось в k случаях, а в $K = k_0 - k$ испытаниях пробой не состоялся, то вероятность пробоя за промежуток времени dt для следующего испытания будет равна

$$dQ_j(U,t) = dk/K = -dK/K. \quad (24)$$

Учитывая (23) и (24) и интегрируя (24) в интервалах от $t = t_0$ до $t = T$ и от k_0 до K соответственно можно получить

$$K/k_0 = \exp \left(- (n_0 + n_e) \int_{t_0}^T \sum_{j=1}^N S_j \int_0^{h_j} g_j dh \cdot q_j(U) dt \right). \quad (25)$$

Таким образом, вероятность пробоя за время t при напряжении U равна

$$Q(U,t) = k/k_0 = 1 - \exp \left\{ - (n_0 + n_e) \int_{t_0}^T \left[\sum_{j=1}^N S_j \int_0^{h_j} g_j dh \cdot q_j(U) dt \right] \right\}. \quad (26)$$

Если $U = U(t)$, тогда $dt = dU/U'$ и $U' = dU/dt$. Тогда в конечном счете вероятность пробоя как функцию U можно представить в виде

$$Q(U) = 1 - \exp \left(- (n_0 + n_e) \int_{U_0}^U \sum_{j=1}^N S_j \int_0^{h_j} g_j dh \cdot \frac{q_j(U)}{U'} dU \right), \quad (27)$$

где U_0 - значение напряжения в момент t_0 .

Ниже представлены примеры применения метода для расчета устройств с высокой напряженностью поля в объеме газовой изоляции.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОБОЯ МАЛОИНДУКТИВНОГО РАЗРЯДНИКА

В генераторах импульсных напряжений высокое напряжение на нагрузке обеспечивается за счет переключения отдельных модулей емкостных накопителей из состояния параллельного соединения в последовательное высоковольтными разрядниками. Такие генераторы нашли широкое применение для создания электрических разрядов в сплошных средах, генерации пучков заряженных частиц, лазерного и микроволнового излучения. Одним из основных требований, предъявляемым к разрядникам [10], является обеспечение низких значений собственной индуктивности для переключения конденсаторов с малыми временными задержками (< 10 нс). В работе [11] предложена конструкция компактного разрядника (рис. 1, а) для генератора импульсных напряжений с высокой плотностью запасаемой энергии. На рисунке обозначено: 1, 2 – профилированные электроды; 3 – твердый диэлектрик; 4 – объем камеры, заполненный элегазом. Малая собственная индуктивность разрядника достигается за счет большой площади поверхности электродов диаметром 0,12 м и малого межэлектродного промежутка, длина которого составляет

3 мм. В области разрядной камеры и электродов высота разрядника не превышает 10 мм.

Для обеспечения высоких значений напряжения пробоя (80...100 кВ) при малых межэлектродных расстояниях разрядная камера заполнялась элегазом повышенного давления (0,45...0,65 МПа). Вся область между электродами за пределами разрядной камеры заполнена электрически более прочной, чем элегаз твердой изоляцией. Профиль разрядной камеры обеспечивал значения напряженности электрического поля в тройных точках (газ – твердый диэлектрик – металл) более низкие, чем порог пробоя межэлектродного промежутка или развития разряда по поверхности твердого диэлектрика.

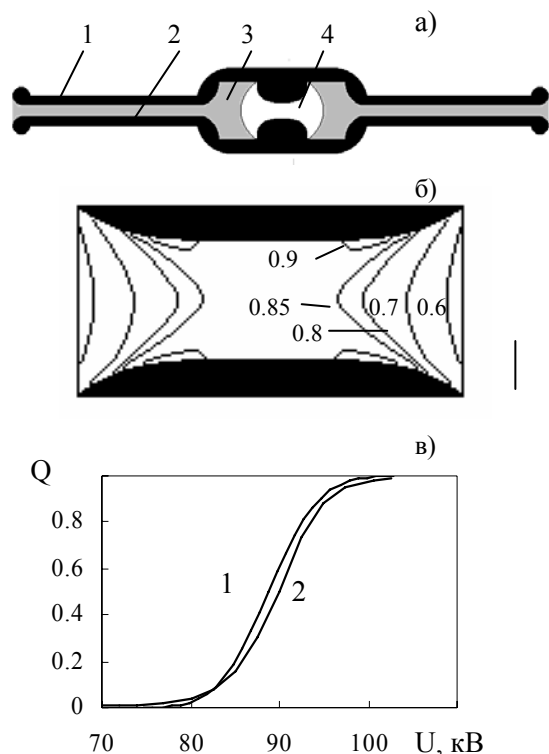


Рис. 1. Конструкция (а), распределение электрического поля (б) и зависимость вероятности пробоя от напряжения (в) компактного малоиндуктивного разрядника

Геометрические параметры компактного разрядника, экспериментальные результаты зависимостей напряжения пробоя от давления, значения напряжений пробоя в серии последовательных импульсов, анализ состояния поверхности электродов и количественная оценка эрозии электродов, полученные в [11], использовались в данной работе для расчета вероятностных характеристик пробоя разрядника.

Распределение напряженности электрического поля в разрядной камере элегазового коммутатора при $U = 90$ кВ изображено на рис. 1, б. Величины напряженностей у изолиний показаны относительно максимального значения $E_m = 33,3$ МВ/м. Расчетная зависимость вероятности пробоя от напряжения, при давлении элегаза 0,45 МПа представлена на рис. 1, в, кривая 2. Для сравнения на этом же рисунке изображена зависимость (кривая 1), построенная по экспе-

риментальным данным работы [11]. Зависимость вероятности пробоя от времени позволяет получить и другие основные вероятностные характеристики пробоя: напряжение пробоя (напряжение при $Q=0,5$), разброс значений пробивных напряжений, электрическую прочность газовой изоляции. Напряжение пробоя разрядника по результатам численного моделирования и экспериментальным данным составляют 90,1 кВ и 88,8 кВ соответственно. Аналогично, разброс напряжений пробоя равен 31 кВ и 27 кВ. Прочность газовой изоляции в межэлектродном промежутке определяется расчетным значением напряжения 72 кВ и величиной напряжения 75 кВ, полученной экспериментально в работе [11]. В целом, результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Силовой блок генератора импульсных напряжений (рис. 2) представляет собой девятисекционную цилиндрическую колонну. Ее секции 1 выполнены в виде металлических оболочек, внутри которых установлены конденсаторы ступеней генератора. Секции разделены кольцевыми полиэтиленовыми изоляторами 2, обеспечивающими также герметичность колонны. Колонна смонтирована на верхней крышке 3 цилиндрического корпуса 4, служащего обратным токопроводом. Секции и корпус изготовлены из нержавеющей стали. Между нижней, наиболее высокопотенциальной секцией блока и нижней крышкой 5 цилиндрического корпуса соосно установлен экран 6, заканчивающийся торообразной поверхностью 7. Объем между колонной и корпусом заполняется газом, служащим высоковольтной изоляцией. Изменением размеров, положения, формы и потенциала экрана можно изменять напряженность электрического поля в объеме газовой изоляции.

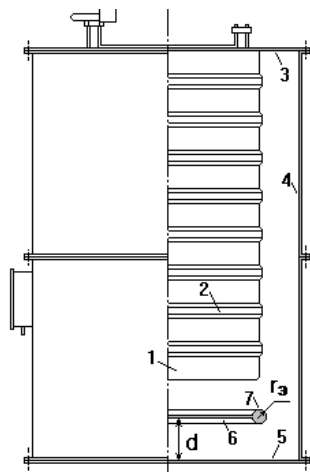


Рис. 2. Силовой блок генератора импульсных напряжений

В конструкции генератора импульсных напряжений реализованы основные результаты работы [10]. Вариант генератора с вакуумной изоляцией разработан и изготовлен совместно Институтом импульсных

процессов и технологий НАН Украины и Институтом сильноточной электроники СО РАН [2].

Расчет электрического поля выполнялся для всего объема силового блока генератора. Распределение поля в области девятой секции, характеризующейся наибольшими значениями напряженности, представлено на рис. 3. Здесь обозначения элементов конструкции генератора те же, что и на рис. 2. Максимальное значение напряженности составляет 20 МВ/м у тороидальной поверхности экрана. Относительно этой величины указаны значения напряженности у изолиний, изображенных на рисунке. Шероховатость поверхности секций задавалась функцией, представленной в [4] и соответствующей реальному распределению микровыступов после обработки и подготовки разнопотенциальных поверхностей.

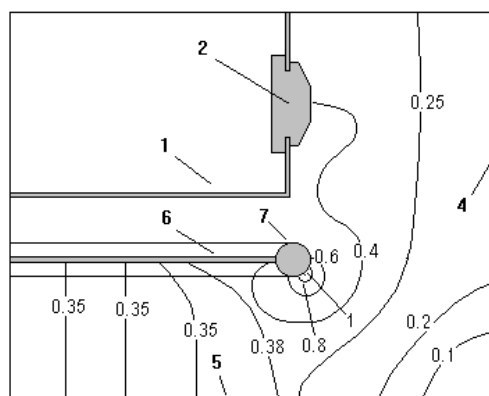


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля в области девятой секции силового блока генератора

На рис. 4 представлены полученные зависимости вероятности пробоя от напряжения при различных давлениях воздушной и элегазовой изоляции.

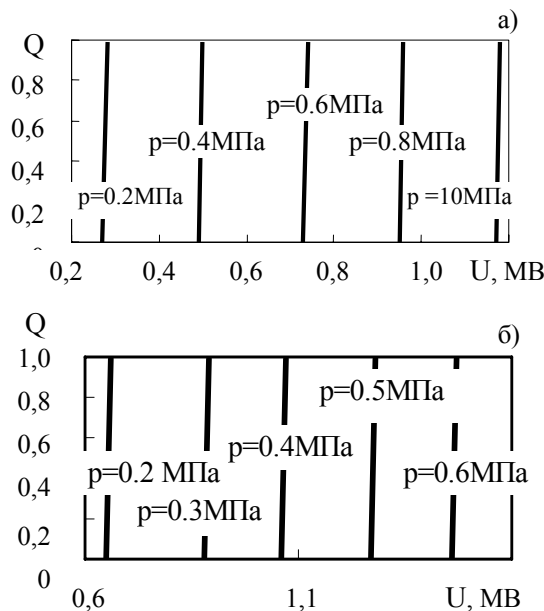


Рис. 4. Зависимости вероятности пробоя для воздушной (а) и элегазовой (б) изоляции генератора

Влияние параметров экрана генератора импульсных напряжений (радиуса торообразной поверхности

r_3 , расстояния d от экрана до нижней крышки бака) на напряженность электрического поля в объеме силового блока изучалось в [2]. В данной работе применение метода расчета позволяет выполнить анализ влияния расположения и размеров экрана на вероятностные характеристики пробоя газовой изоляции. Так, на рис. 5, а (кривые 1–5) изображены зависимости вероятности пробоя газовой изоляции генератора (смесь азот N_2 – элегаз SF_6 в соотношении 0,75 : 0,25) при различных давлениях смеси и параметрах экрана d и r_3 , указанных на рис. 2:

- 1 – $d = 0,15$ м, $r_3 = 0,015$ м, $p = 0,1$ МПа;
- 2 – $d = 0,15$ м, $r_3 = 0,015$ м, $p = 0,2$ МПа;
- 3 – $d = 0,15$ м, $r_3 = 0,01$ м, $p = 0,3$ МПа;
- 4 – $d = 0,15$ м, $r_3 = 0,015$ м, $p = 0,3$ МПа;
- 5 – $d = 0,09$ м, $r_3 = 0,015$ м, $p = 0,3$ МПа.

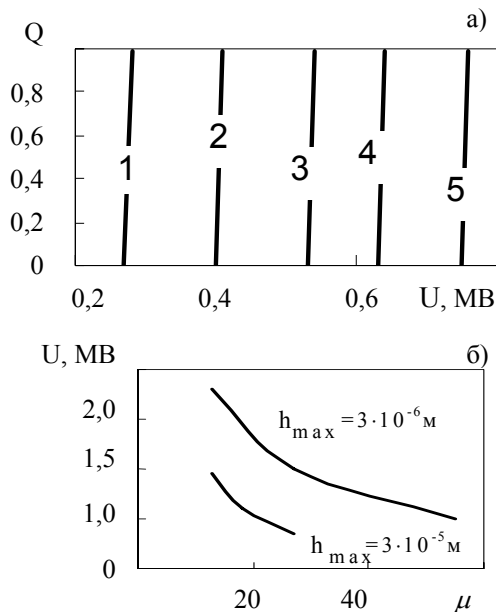


Рис. 5. Зависимости вероятности пробоя от параметров экрана (а) и напряжения пробоя от параметров, определяющих шероховатость высокопотенциальной поверхности (б)

Требования к чистоте обработки высокопотенциальной поверхности могут быть сформулированы на основании результатов, представленных на рис. 5, б, где показаны зависимости напряжения пробоя для различных значений коэффициента усиления поля μ и разных максимальных значений высот микровыступов для заданной шероховатости поверхности. Результаты свидетельствуют о том, что надежная работа газовой изоляции генератора под напряжением 1 МВ может быть достигнута для смеси газа азот – элегаз в соотношении (0,75 : 0,25) при давлениях 0,4 МПа и выше, если размеры микровыступов на тороидальной поверхности экрана не будут превышать 30 мкм, а коэффициент усиления поля микровыступами будет иметь значения $\mu < 20$.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе обобщен метод расчета вероятностных характеристик пробоя газовой изоляции [4] на случай полей со значениями напряженности выше 5 МВ/м, когда на характеристики пробоя оказывает влияние совокупность механизмов инициирования свободных электронов в межэлектродном промежутке, связанных с образованием диэлектрических включений, адсорбцией газа у поверхности электродов, автоэлектронной эмиссией электронов с микроострий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
- [2] Дубовенко К.В. Влияние экранирования на электрическую прочность компактного субмегавольтового генератора импульсных напряжений с вакуумной изоляцией // Техническая электродинамика. – 2000. - № 4. – С. 8–13.
- [3] Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / Бейер М., Бек В., Меллер К., Цаенгль В. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
- [4] Дубовенко К.В. Моделювання імовірності пробую газовой ізоляції високовольтних пристроїв систем імпульсної електроенергетики // Технічна електродинаміка. – 2006. - № 2. – С. 15–22.
- [5] Dubovenko K.V., Kurashko Yu.I. The Design, Fabrication and Testing of a Closing Switch for Compact Electrical Discharge Industrial Equipment // 11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers. Baltimore, Maryland, USA. – 1997, vol. 2. – PP. 868–874.
- [6] Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Швець И.С. Анализ вероятностных характеристик пробоя компактного высоковольтного разрядника с газовой изоляцией // Труды 3-ей междунар. конф. "Электрическая изоляция – 2002" (ICEI 2002). – СПб.: Нестор, 2002. – С. 370–372.
- [7] Ильин В.П. Численные методы решения задач электрофизики. – М.: Наука, 1985. – 334 с.
- [8] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. – Новосибирск: Наука, 1982. – 254 с.
- [9] Александров А.Л., Базелян А.Э., Базелян Э.М. и др. Моделирование длинных стримеров в газе атмосферного давления // Физика плазмы. – 1995, т. 21, № 1. – С. 67–80.
- [10] Ковальчук Б.М., Кремнев В.В. Генераторы Аркадьева-Маркса для сильноточных ускорителей / Физика и техника мощных импульсных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 165–179.
- [11] Goerz D.A., Wilson M.J., Speer R.D. A Low-Profile High-Voltage Compact Gas Switch // 11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers. Baltimore, Maryland, USA. – 1997, vol. 1. – PP. 328–333.

Поступила 02.09.2006