

М.И. Баранов

## УПРОЩЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МНОГОАЗОРНЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

*Виконано наближений розрахунок розподілу зарядів, напруг і ємностей у високовольтній конденсаторній конструкції плоского типу, застосовуваної в газових розрядниках і утримуючої між двома основними металевими електродами ряд розділених ізоляційними зазорами допоміжних металевих электродів. Установлено, що час електричного пробоя в ній повного ізоляційного проміжку між основними електродами визначається часом пробоя одного з ізоляційних зазорів між її допоміжними й основними електродами.*

*Выполнен приближенный расчет распределения зарядов, напряжений и емкостей в высоковольтной конденсаторной конструкции плоского типа, применяемой в газовых разрядниках и содержащей между двумя основными металлическими электродами ряд разделенных изоляционными зазорами вспомогательных металлических электродов. Установлено, что время электрического пробоя в ней полного изоляционного промежутка между основными электродами определяется временем пробоя одного из изоляционных зазоров между ее вспомогательными и основными электродами.*

### ВВЕДЕНИЕ

Многоазорные конденсаторные конструкции (МКК), содержащие разделенные рядом изоляционных промежутков основные и вспомогательные металлические электроды различной геометрической формы, нашли достаточно широкое применение в высоковольтной импульсной технике (ВИТ). Прежде всего, это касается основной элементной базы ВИТ: высоковольтных конденсаторов с твердо-жидкостной изоляцией, предназначенных для накопления электрической энергии, а также высоковольтных разрядников с газовой изоляцией, выполняющих в высоковольтных цепях электрофизических установок (ЭФУ) роль ключей-коммутаторов и обеспечивающих быструю передачу запасенной в их конденсаторах электрической энергии к нагрузке [1-3]. Несмотря на практическое многолетнее использование в области ВИТ указанных МКК, физика протекающих в них основных электроразрядных процессов рассмотрена в недостаточном для современного этапа развития ВИТ объеме. Например, до сих пор нет однозначного теоретического подхода к электрофизическим вопросам, связанным с механизмами и процессами, лежащими в основе электрического пробоя в МКК изоляционного промежутка между их основными металлическими электродами. Практика применения МКК в составе высоковольтных газовых разрядников свидетельствует о значительном уменьшении в таких конструкциях и соответственно в электрических цепях ЭФУ с ними времени коммутации  $\tau_k$  их напряжения и разрядного тока [3-5]. Однозначные физические объяснения и простые ясные для пользователя-электрофизика расчетные обоснования этому электроразрядному процессу в высоковольтной цепи ЭФУ с применением МКК в настоящее время отсутствуют.

Целью данной статьи является разработка упрощенных физических основ для основных электроразрядных процессов, протекающих в высоковольтных газовых разрядниках, использующих МКК.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ МКК

Рассмотрим упрощенную конструкцию высоковольтного многоазорного газового разрядника плос-

кого типа с воздушной изоляцией при нормальных условиях (температура воздушной среды равна  $T_0=0$  °С, а ее давление составляет величину  $p_0=101,325$  кПа [6]), содержащую два основных и два вспомогательных плоских металлических электрода, разделенных межэлектродными идентичными изоляционными зазорами шириной  $h$  (рис.). Пусть основные 1, 2 и вспомогательные 3, 4 электроды данной МКК имеют одинаковые геометрические размеры. Для общности решаемой задачи принимаем, что один из основных электродов (катод) имеет отрицательный электрический потенциал  $-\phi_k$ , а другой основной электрод (анод) – положительный электрический потенциал  $+\phi_a$ . Условимся, что модули этих потенциалов равны друг другу  $|\phi_a|=|\phi_k|$ , аноду 1 соответствует равномерно распределенный по его обращенной к катоду 2 плоской поверхности электрический заряд  $+q_a$ , а катоду 2 – электрический заряд  $-q_k$ , равномерно распределенный по его плоской поверхности, обращенной к аноду 1. Краевыми полевыми эффектами в рассматриваемой МКК плоского типа пренебрегаем.

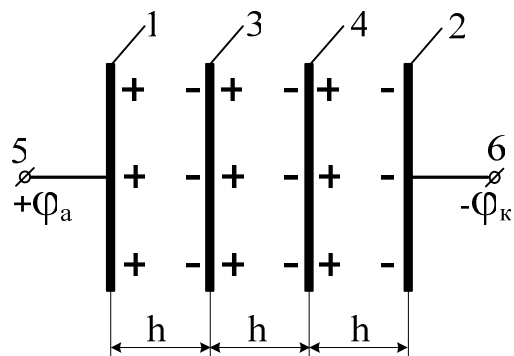


Рис. Расчетная модель плоской МКК газового разрядника

Из принятой геометрии основных и вспомогательных ("глухих" или "слепых" и не имеющих гальванических подсоединений) электродов в рассматриваемой МКК следует, что изоляционный промежуток между ее основными электродами 1 и 2 в нашем случае составляет величину, равную  $3h$ . Считаем, что исследуемая МКК воздушного разрядника посредст-

вом высоковольтных выводов 5 и 6 ее основных электродов включена в разрядную цепь ЭФУ с накопителем энергии конденсаторного типа. Заметим, что указанная плоская конструкция высоковольтного многозазорного газового (вакуумного) разрядника нашла в последнее время определенное применение при создании за рубежом сверхмощных ЭФУ с емкостными накопителями энергии, предназначенных для быстрой коммутации (значения времени  $\tau_k$  составляют порядка  $10^{-8}$  с) их разрядного тока и световой накачки мощных квантовых генераторов для осуществления в импульсном режиме управляемых термоядерных реакций и получения электроэнергии [7, 8].

Требуется с учетом принятых допущений и ограничений разработать в упрощенном виде физические основы электроразрядных процессов, наблюдаемых в межэлектродных промежутках принятой МКК высоковольтного газового разрядника как до, так и после электрического пробоя ее воздушных изоляционных зазоров величиной  $h$ .

## 2. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В МКК

В соответствии с явлением электрической индукции [6], наблюдаемым в исследуемом случае между основными и вспомогательными металлическими электродами МКК до ее пробоя, на электронейтральных вспомогательных электродах 3, 4 из-за действия напряженности электрического поля  $E_{ак} = 2\varphi_a / 3h$  между основными 1 и 2 электродами будет происходить неравномерное распределение их свободных электронов. Причем, на первом к аноду 1 вспомогательном электроде 3 (см. рис.) это распределение электронов приводит к тому, что на его обращенной к нему (аноду 1) плоской поверхности появляется избыток электронов (отрицательный связанный заряд  $-q_3$ ), а на его обращенной к катоду 2 противоположной плоской поверхности – недостаток электронов (положительный связанный заряд  $+q_3$ ). Аналогичное распределение свободных электронов произойдет и на втором электронейтральном вспомогательном электроде 4, расположенном вблизи катода 2 принятой МКК. Здесь появятся индуцированные связанные электрические заряды противоположной полярности соответственно величиной  $-q_4$  и  $+q_4$ . Наличие указанных электрических зарядов на плоских поверхностях основных и вспомогательных электродов МКК приведет к образованию в ее расчетной модели ряда соответствующих емкостей:  $C_{ак}$  – емкости между анодом 1 и катодом 2 в МКК;  $C_{13}$  – емкости между анодом 1 и вспомогательным электродом 3;  $C_{34}$  – емкости между вспомогательными электродами 3 и 4;  $C_{42}$  – емкости между вспомогательным электродом 4 и катодом 2 в МКК. Согласно принятым условиям и законам электростатики для решаемой задачи модули распределенных по металлическим поверхностям электрических зарядов в расчетной МКК будут удовлетворять следующему соотношению:

$$|q_a| = |q_k| = |q_3| = |q_4|. \quad (1)$$

В связи с электронейтральностью вспомогательных металлических электродов 3 и 4 суммарный положительный заряд в расчетной модели МКК в допробойном режиме электроразрядных процессов в их изоляционных зазорах шириной  $h$  будет оставаться равным величине  $+q_a$ , а суммарный отрицательный заряд – величине, равной  $-q_k$ . Поэтому индукционное распределение зарядов в рассматриваемой МКК не приводит к появлению в ней новых дополнительных несвязанных электрических зарядов. Это положение находится в полном согласии с законами сохранения заряда и электрической энергии в цепи МКК [6].

## 3. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МКК

Учитывая одинаковые в МКК электрические условия, в которых находятся ее идентичные электроды и равные изоляционные зазоры величиной  $h$ , можно утверждать, что электрическое напряжение  $U_{ак} = 2\varphi_a$  между анодом 1 и катодом 2 исследуемой конструкции газового разрядника будет равномерно распределяться между его плоскими основными и вспомогательными металлическими электродами. Тогда, для распределения напряжений между основными и вспомогательными электродами рассматриваемой МКК следует записать следующее соотношение:

$$U_{13} = U_{34} = U_{42} = U_{ак} / 3, \quad (2)$$

где  $U_{13}$  – напряжение между анодом 1 и вспомогательным электродом 3;  $U_{34}$  – напряжение между вспомогательными электродами 3 и 4;  $U_{42}$  – напряжение между вспомогательным электродом 4 и катодом 2.

Из (2) вытекает, что полное электрическое напряжение между выводами 5 и 6 основных электродов МКК до электрического пробоя ее изоляционных зазоров шириной  $h$  составляет величину, точно равную

$$U_{ак} = U_{13} + U_{34} + U_{42} = 2\varphi_a. \quad (3)$$

Видно, что выражения (2) и (3) полностью соответствуют распределению напряжения между последовательно соединенными идентичными электрическими емкостями в линейной электрической цепи [6].

## 4. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЕМКостей В МКК

С учетом принятых допущений, выражений (1), (3) и известных формул из электростатики для емкости  $C_{ак}$  между основными металлическими электродами (анодом 1 и катодом 2) исследуемой МКК газового разрядника в обобщенном виде получаем:

$$C_{ак} = q_a / U_{ак}. \quad (4)$$

Используя (1) и (2), для емкостей между основными и вспомогательными металлическими электродами МКК газового разрядника находим:

$$C_{13} = C_{34} = C_{42} = 3q_a / U_{ак}. \quad (5)$$

Из (4) и (5) видно, что емкости между плоскими электродами рассматриваемой МКК, разделенными изоляционными зазорами шириной  $h$ , в три раза пре-

вышают емкость между основными электродами (анодом 1 и катодом 2), разделенными изоляционным промежутком величиной  $3h$ . Кроме того, принятая геометрия МКК и вытекающее из нее электрическое соединение емкостей  $C_{13}$ ,  $C_{34}$  и  $C_{42}$  свидетельствуют о том, что эти емкости в цепи МКК газового разрядника соединены последовательно. В этой связи для указанных емкостей МКК в доразрядном и разрядном режимах будет справедливо выражение вида:

$$C_{ак}^{-1} = C_{13}^{-1} + C_{34}^{-1} + C_{42}^{-1}. \quad (6)$$

Подстановка в (6) расчетных результатов согласно (4) и (5) подтверждает правильность полученных данных по распределению электрических емкостей в исследуемой модели МКК. Несмотря на трехкратное увеличение межэлектродных емкостей  $C_{13}$ ,  $C_{34}$  и  $C_{42}$  по сравнению с общей емкостью  $C_{ак}$  цепи МКК, из-за трехкратного уменьшения межэлектродных напряжений  $U_{13}$ ,  $U_{34}$  и  $U_{42}$  по сравнению с полным напряжением  $U_{ак}$  между основными электродами МКК разрядный ток  $i_{ак}$  в ее цепи при электрическом пробое всех изоляционных зазоров шириной  $h$  остается неизменным и равным

$$\begin{aligned} i_{ак} &= -C_{13} \frac{dU_{13}}{dt} = -C_{34} \frac{dU_{34}}{dt} = \\ &= -C_{42} \frac{dU_{42}}{dt} = -C_{ак} \frac{dU_{ак}}{dt}. \end{aligned} \quad (7)$$

#### 5. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ЗАЗОРОВ В МКК

Выполненные выше расчетные оценки и полученные на их основе результаты показывают, что в принятой модели МКК газового (воздушного) разрядника все изоляционные воздушные зазоры шириной  $h$  находятся в равных электрических условиях и испытывают воздействие напряжения одинаковой величины  $U_{ак}/3$ . При достижении напряженности электрического поля  $E_{ак} = E_{13} = E_{34} = E_{42} = U_{ак}/3h$  во всех межэлектродных воздушных зазорах МКК шириной  $h$  уровня, равного примерно  $3 \cdot 10^6$  В/м [6], в них возникает электрический искровой разряд, приводящий к электрическому пробое всего воздушного промежутка шириной  $3h$  между основными электродами МКК атмосферного давления. Причем, из-за равных условий развития электронных лавин и ионизации воздуха между электродами МКК данный искровой разряд и соответственно появление плазменных каналов во всех межэлектродных изоляционных зазорах шириной  $h$  возникает одновременно. Поэтому и их электрический пробой происходит также одновременно. В принятой модели МКК газового разрядника минимальное время электрического пробоя  $t_p$  его изоляционного зазора шириной  $h$  можно определить из следующего расчетного соотношения:

$$t_p = h / v_{п}, \quad (8)$$

где  $v_{п} = 10^5$  м/с [8] – максимальная скорость движения плазмы в воздушных зазорах исследуемой МКК.

С учетом изложенного выше можно считать, что время  $t_p$ , найденное по (8), будет определять полное время электрического пробоя всего промежутка шириной  $3h$  в МКК и коммутационные характеристики газового разрядника. Иначе говоря, для рассматриваемой конструкции многоззорного газового разрядника будет выполняться соотношение вида:

$$\tau_k = t_p = h / v_{п}. \quad (9)$$

Соотношение (9) при заданном численном значении величины времени коммутации  $\tau_k$  для многоззорного газового разрядника на рабочее напряжение  $U_{ак}$  позволяет найти ширину  $h$  его отдельного межэлектродного воздушного зазора по формуле:

$$h = \tau_k \cdot v_{п}. \quad (10)$$

При наличии в МКК воздушного разрядника атмосферного давления на рабочее напряжение  $U_{ак}$  не трех, как в принятом случае, а  $n$  изоляционных межэлектродных зазоров их количество в системе СИ может быть рассчитано по следующей формуле:

$$n = U_{ак} (3 \tau_k \cdot v_{п} \cdot 10^6)^{-1}. \quad (11)$$

Таким образом, на основе приближенных расчетов впервые в ВИТ показано, что в многоззорном воздушном разряднике атмосферного давления время его коммутации  $\tau_k$  определяется временем пробоя его отдельного межэлектродного зазора шириной  $h$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова.- М.: Атомиздат, 1970.-472 с.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.- М.: Мир, 1972. - 391 с.
3. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике.- Новосибирск: Наука, 1987. – 226 с.
4. Баранов М.И., Бочаров Ю.П., Зябко Ю.П. и др. Высоковольтные сильноточные искровые коммутаторы для генераторов импульсных напряжений и токов // Технічна електродинаміка.-2003.- №3. - С. 41-47.
5. Баранов М.И. Применение новых газоразрядных и твердотельных полупроводниковых коммутаторов в сильноточных цепях мощных высоковольтных электрофизических установок // Електротехніка і електромеханіка.- 2009.- №1. - С. 55-58.
6. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики/ Отв. ред. В.К. Тартаковский.- Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
7. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника.- М.: Наука, 2004. – 704 с.
8. Баранов М.И. Применение новых вакуумных коммутаторов в сильноточных цепях мощных высоковольтных электрофизических установок и схемах аварийной защиты силового электрооборудования // Електротехніка і електромеханіка. - 2009.- №2. - С. 75-81.

Поступила 03.09.2008

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.  
НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"  
тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33,  
e-mail: eft@kpi.kharkov.ua