

М.И.Баранов, докт. техн. наук (НИПКИ «Молния» Нац. техн. ун-та «ХПИ», Харьков)

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ В СИЛЬНОТОЧНОМ КАНАЛЕ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ВОЗДУШНОГО КОММУТАТОРА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Приведены соотношения для расчетной оценки максимальной электронной температуры T_{me} в плазменном канале искрового разряда между электродами высоковольтного сильноточного воздушного коммутатора атмосферного давления. Показано, что полученные результаты расчета температуры T_{me} согласуются с известными экспериментальными данными для ее прямых измерений в низкотемпературной плазме сильноточных искровых разрядов, происходящих в воздушных разрядных промежутках высоковольтных коммутаторов с металлическими электродами.

Наведено співвідношення для розрахункової оцінки максимальної електронної температури T_{me} у плазмовому каналі іскрового розряду між електродами високовольтного сильнострумного повітряного комутатора атмосферного тиску. Показано, що отримані результати розрахунку температури T_{me} узгоджуються з відомими експериментальними даними для її прямих вимірів у низькотемпературній плазмі сильнострумних іскрових розрядів, які відбуваються в повітряних розрядних проміжках високовольтних комутаторів з металевими електродами.

Введение. Высоковольтные искровые газовые (воздушные) коммутаторы широко используются в сильноточных электрических цепях мощных электрофизических установок (ЭФУ) с емкостными (индуктивными) накопителями энергии, применяемых для получения больших импульсных токов (БИТ), сильных электрических и магнитных полей, которые находят практическое использование в различных научных и технологических целях [2,6,7,15]. Образующаяся при искровом разряде в изоляционных разрядных промежутках таких коммутаторов низкотемпературная плазма приводит к активной электрической эрозии их электродов [4,10]. Для рационального выбора в рабочих электроразрядных промежутках высоковольтных сильноточных искровых коммутаторов (ВСИК) повышенного или атмосферного давления газа материала их основных и управляющих (поджигающих) электродов и определения режима работы ВСИК необходимо знать возникающие уровни температуры в плазменных каналах искровых разрядов указанных коммутаторов. Опытное измерение температуры плазмы в каналах импульсных сильноточных искровых разрядов ВСИК при всей своей сложности и трудоемкости, как правило, сопряжено с внесением дополнительных немалых погрешностей в ее определение [9,11]. Имеющиеся согласно [3,9] в области высоковольтной импульсной техники, электро- и теплофизики приближенные расчетные соотношения применимы для оценки температуры «металлической» плазмы, возникающей в межэлектродных промежутках при электрическом взрыве в их газовых и жидких средах тонких металлических проводников, включенных в разрядную электрическую цепь мощной электрофизической установки ЭФУ. Поэтому определенный научный и практический интерес представляет электрофизическая задача, связанная с расчетной оценкой температуры плазмы в разрядных газовых промежутках ВСИК, использующих чисто металлические или металлокерамические электроды различных геометрических форм, и опытная проверка полученных результатов.

Целью статьи является получение соотношений для приближенного расчета максимальной температуры плазмы в сильноточном канале искрового разряда, возникающего в рабочем воздушном промежутке между металлическими электродами ВСИК атмосферного давления.

Постановка задачи исследования. Рассмотрим включенный в разрядную электрическую цепь высоковольтной ЭФУ с мощным емкостным накопителем энергии (ЕНЭ) воздушный ВСИК атмосферного давления. Ограничимся рассмотрением случая, когда воздушная среда до срабатывания коммутатора и возникновения в нем сильноточного искрового разряда находится при нормальных условиях (давление воздуха составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па, а его температура равна 0°C [12]). Считаем, что данный ВСИК содержит два основных массивных металлических электрода 1 и 2, выполненных из

однородного материала и являющихся соответственно анодом и катодом в двухэлектродном воздушном разрядном промежутке коммутатора (рис. 1). Полагаем, что при электрическом пробое в ВСИК воздушного промежутка длиной l_k (например, за счет его поджига путем подачи на управляющий электрод высоковольтного импульса напряжения [15]) через электроды коммутатора протекает БИТ с амплитудно-временными параметрами (АВП), характерными для колебательного разряда ЕНЭ на активно-индуктивную нагрузку. Пусть замыкающий металлические электроды ВСИК проводящий сильноточный плазменный канал 3 воздушного искрового разряда имеет в соответствии с рис. 1 форму цилиндра длиной l_k с максимальным радиусом, равным r_m . Считаем, что для плазмы искрового разряда между электродами воздушного ВСИК атмосферного давления выполняется условие ее неизотермичности, при котором в ней максимальная температура носителей электронного тока T_{me} превышает максимальную температуру носителей ионного тока T_{mi} ($T_{me} > T_{mi}$) [12]. Поэтому ниже остановимся на определении максимальной электронной температуры T_{me} в плазменном канале искрового разряда ВСИК. Принимаем, что при наличии в ВСИК указанного канала искрового разряда катоду коммутатора соответствует приэлектродное падение напряжения U_k , а аноду – приэлектродное падение напряжения U_a . Допускаем, что значения напряжений U_k и U_a незначительно отличаются друг от друга ($U_k \approx U_a$), не зависят от АВП протекающего через электроды коммутатора разрядного тока ЭФУ и целиком определяются видом материала электродов воздушного ВСИК [1]. Используем приближение одинаковости по круговому поперечному сечению канала разряда плотности затухающего синусоидального тока разрядной цепи ЭФУ, принимающей максимальное амплитудное значение, равное δ_m . Изменением значений δ_m вблизи рабочих поверхностей катода и анода в воздушном разрядном промежутке ВСИК пренебрегаем [8]. Требуется с учетом принятых допущений выполнить приближенную расчетную оценку максимальной температуры T_{me} плазмы в канале искрового разряда рассматриваемого ВСИК.

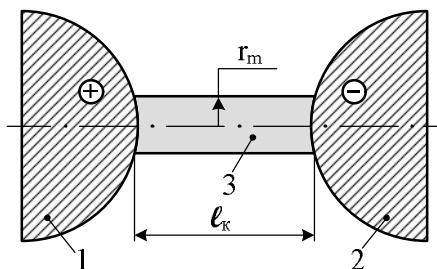


Рис. 1

Основные расчетные соотношения. На основании закона Стефана-Больцмана для максимальной плотности теплового потока q_{mk} , действующего со стороны сильноточного плазменного канала искрового разряда на металлические электроды ВСИК, запишем следующее аналитическое соотношение [12]:

$$q_{mk} = \pi^{-1} \sigma_c T_{me}^4, \quad (1)$$

где $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)^{-1}$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Из (1) для искомой электронной температуры T_{me} получаем следующее выражение:

$$T_{me} = \sqrt[4]{\pi \sigma_c^{-1} q_{mk}}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что нахождение значений температуры T_{me} сводится к определению величины q_{mk} в плазменном канале искрового разряда между электродами коммутатора, которую находим из следующего соотношения [8]:

$$q_{mk} = \delta_m \cdot U_a. \quad (3)$$

Для определения в (3) величины максимальной плотности тока δ_m в плазменном канале искрового разряда используем расчетную формулу, имеющую вид

$$\delta_m = I_m / (\pi r_m^2), \quad (4)$$

где I_m – максимальное значение амплитуды колебательного тока в разрядной цепи ЭФУ с ЕНЭ.

При оценке в системе СИ значений максимального радиуса r_m воспользуемся формулой Брагинского [13]:

$$r_m = 0,093 (I_m)^{1/3} (t_m)^{1/2}, \quad (5)$$

где t_m – время, соответствующее первой (наибольшей) амплитуде I_m затухающего синусоидального тока ЕНЭ в разрядной цепи ЭФУ.

Тогда из (2)–(5) в окончательном виде для максимальной электронной температуры T_{me} в принятом приближении находим

$$T_{me} = 3,28 \sqrt[4]{\frac{I_m^{1/3} U_a}{\sigma_c t_m}}. \quad (6)$$

Из анализа полученной формулы (6) для расчетной оценки значений T_{me} следует, что при одинаковых величинах амплитуд коммутируемого тока I_m для воздушного ВСИК наибольшие электронные температуры плазмы в его искровом разрядном промежутке будут наблюдаться при наименьших значениях времени t_m . В этой связи для достижения рекордных электронных температур T_{me} в плазменных искровых каналах ВСИК, используемых в ряде случаев в качестве активной электроразрядной среды рабочих камер специальных электротехнологических установок [7,9,14], следует использовать «быстрые» генераторы БИТ, формирующие сверхвысокочастотные импульсы тока с малыми значениями t_m . Что касается численных значений приэлектродного напряжения $U_a \approx U_k$ в (6), то для основных проводниковых материалов, применяемых в газоразрядных электродных системах ВСИК, они изменяются в достаточно узком диапазоне, составляющем примерно 5–10 В [1,8]. Поэтому согласно (6) основными электрическими параметрами, определяющими значения электронной температуры T_{me} плазмы в разрядных воздушных промежутках ВСИК, будут значения протекающей через них амплитуды разрядного импульсного тока I_m и длительности четверти первой токовой волны t_m . Причем, чем больше значение тока I_m и одновременно меньше значение времени t_m , тем будет выше достигаемая электронная температура T_{me} .

Пример расчета электронной температуры T_{me} плазмы в коммутаторе. Остановимся на реальной конструкции воздушного сильноточного коммутатора атмосферного давления на номинальное напряжение ± 50 кВ типа ТКВР-50 [6], содержащего массивные стальные основные полусферические электроды диаметром 123 мм (выполнены из стали марки Ст.3, $l_k = 15$ мм) и предназначенного для коммутации в составе мощного генератора тока искусственной молнии БИТ микросекундного временного диапазона [5]. Согласно [1] для стальных электродов выбранного высоковольтного воздушного коммутатора $U_a = 6,1$ В. На рис. 2 показана осциллограмма разрядного затухающего синусоидального тока мощного ЕНЭ, прошедшего через ВСИК типа ТКВР-50 (масштаб по вертикали – 56,3 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка) [6]. В соответствии с приведенной осциллограммой импульсного тока с первой полуволной отрицательной полярности, его АВП по модулю были равными: $I_m = 212$ кА; $t_m = 34$ мкс; полная длительность импульса тока $\tau_{II} = 500$ мкс; количество протекшего в токовом импульсе электрического заряда $q_c = 9,21$ Кл. Выполненные при этом на осно-

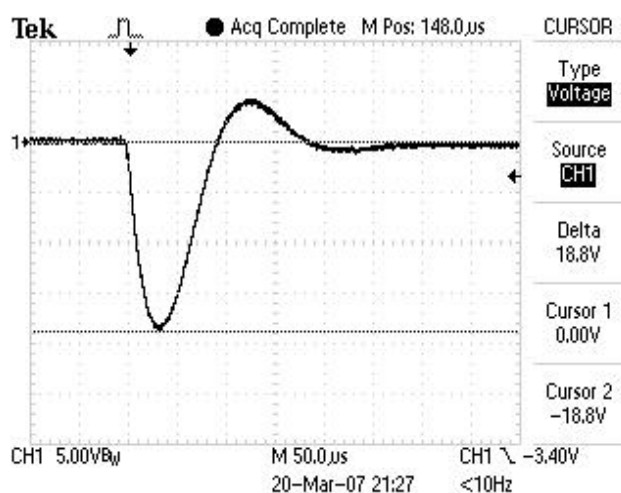


Рис. 2

вании выражений (3)–(5) расчетные оценки радиуса канала разряда r_m , плотности тока δ_m и плотности теплового потока q_{mk} в воздушном разрядном промежутке указанного сильноточного коммутатора показывают, что в данном случае для коммутатора типа ТКВР-50 они принимают следующие численные значения: $r_m = 32,31$ мм; $\delta_m = 6,46 \cdot 10^7$ А/м²; $q_{mk} = 3,94 \cdot 10^8$ Вт/м².

Подставив указанные выше численные значения U_a , I_m и t_m в расчетную формулу (6), для температуры T_{me} получаем численное значение, равное $12,15 \cdot 10^3$ К. Заметим, что данное расчетное значение удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными для T_{me} , пред-

ставленными для мощных воздушных искровых разрядов в [3,9,11,15] и составляющими для принятых условий в разрядном контуре ЕНЭ около $10 \cdot 10^3$ К. Выполненные автором с помощью высоковольтного воздушного коммутатора типа ТКВР-50 [6] и генератора тока искусственной молнии [5] эксперименты, связанные с опытным определением результатов воздействия сильноточного плазменного канала искрового разряда на его массивные стальные электроды, подтвердили правомерность использования для БИТ микросекундного временного диапазона расчетной формулы (5) при оценке радиуса r_m искрового канала в электроразрядном промежутке коммутатора. В данных экспериментах величина r_m соответствовала максимальному радиусу r_{Π} зоны привязки плазменного канала на наружных поверхностях стальных полусферических электродов коммутатора типа ТКВР-50, численно составляющему для указанных условий ($U_a=6,1$ В; $I_m=212$ кА; $t_m=34$ мкс) значение, равное примерно 31 мм.

Выводы. Получена приближенная расчетная формула (6) для оценки максимальной электронной температуры T_{me} в плазменном канале сильноточного искрового разряда воздушного ВСИК атмосферного давления с металлическими электродами. Выполненные по формуле (6) расчетные оценки температуры в сильноточном плазменном канале искрового разряда между стальными электродами воздушного коммутатора атмосферного давления на номинальное напряжение ± 50 кВ типа ТКВР-50, коммутирующего БИТ микросекундного временного диапазона с первой амплитудой затухающего синусоидального импульсного тока $I_m=212$ кА при времени ее достижения $t_m=34$ мкс показывают, что для этого используемого в практике электромагнитных испытаний объектов авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость случая максимальная электронная температура плазмы в разрядном промежутке рассматриваемого ВСИК $T_{me}=12,15 \cdot 10^3$ К. Сравнение полученного расчетного численного значения температуры T_{me} с известными экспериментальными результатами ее прямого измерения в каналах сильноточных воздушных искровых разрядов свидетельствует об их удовлетворительном согласовании.

1. *Абрамов Н.Р., Кужекин И.П., Ларионов В.П.* Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // *Электричество*. – 1986. – №11. – С. 22–27.
2. *Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябко Ю.П. и др.* Высоковольтные сильноточные искровые коммутаторы для генераторов импульсных напряжений и токов // *Техн. электродинамика*. – 2003. – №3. – С. 41–47.
3. *Баранов М.И.* Приближенный расчет минимальной температуры плазмы при электрическом взрыве проводников под воздействием больших импульсных токов // *Электротехника и электромеханика*. – 2004. – №1. – С. 62–65.
4. *Баранов М.И.* Приближенный расчет электрической эрозии металлических электродов высоковольтных сильноточных искровых коммутаторов // *Техн. электродинамика*. – 2004. – №5. – С. 11–14.
5. *Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др.* Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – №3. – С. 81–85.
6. *Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др.* Высоковольтные сильноточные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – №6. – С. 58–62.
7. *Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др.* Высоковольтные искровые разрядники для технологических установок // *Приборы и техника эксперимента*. – 2001. – №2. – С. 79–88.
8. *Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А. и др.* Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. – М.: Энергия, 1978. – 256 с.
9. *Гулый Г.А.* Научные основы разрядно-импульсных технологий. – Киев: Наук. думка, 1990. – 208 с.
10. *Зорин В.Б., Головина У.Ю., Мазурин И.М. и др.* Эрозия электродов при сильноточном мегавольтном разряде в элегазе // *Журнал технической физики*. – 1986. – Т.56. – №5. – С. 926–929.
11. *Ильин Г.Г., Нурматов Э.М., Фишман И.С.* Определение температуры и других параметров плазмы взрывающейся проволоки по самообращенным спектральным линиям и спектрам поглощения // *Теплофизика высоких температур*. – 1975. – Т.13. – №2. – С. 288–294.
12. *Кузьмичев В.Е.* Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К.Тартаковский. – Киев: Наук. думка, 1989. – 864 с.
13. *Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б.* Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.
14. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
15. *Техника больших импульсных токов и магнитных полей* / Под ред. В.С.Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.

Надійшла 06.01.2009