

УДК 621.387.35

Устойчивость горения вакуумной дуги постоянного тока в осесимметричном радиальном магнитном поле

Д. Ф. Алферов, В. П. Иванов, В. А. Сидоров

ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", Москва, Россия

Исследована устойчивость горения вакуумной дуги постоянного тока в осесимметричном радиальном магнитном поле, которое формируется электромагнитной катушкой, размещенной под одним из дисковых электродов управляемого вакуумного промежутка. Показано, что ток среза вакуумной дуги увеличивается до 300 А при индукции радиальной составляющей магнитного поля ~70—80 мТл. Обсуждены возможные физические процессы, приводящие к нарушению устойчивости вакуумной дуги в радиальном магнитном поле.

Устойчивость горения вакуумной дуги сильно зависит от величины тока и уменьшается при приближении тока к нулю, когда начинают погасать катодные пятна (КП), которые являются источниками направленных потоков сильно ионизованной плазмы. Гашение дуги происходит при некотором конечном значении тока — тока среза и выражается в резком спаде тока до нуля [1, 2].

Для сравнительно короткой вакуумной дуги (размер вакуумного зазора не превышает 1—2 см) ток среза зависит от материала электродов и параметров внешней цепи, в том числе и от способности внешней цепи поддерживать напряжение, необходимое для горения дуги. В режиме диффузной вакуумной дуги падение напряжения на вакуумном промежутке, как правило, не превышает 20—50 В, и ток среза составляет ~ 2—20 А для разных материалов электродов.

Существенно повысить напряжение на вакуумном промежутке и тем самым увеличить ток среза можно с помощью поперечного относительно направления тока дуги магнитного поля [3, 4]. Данное обстоятельство может быть использовано для эффективного отключения постоянного тока.

Наложение поперечного магнитного поля на вакуумную дугу приводит к существенному изменению динамики КП и генерируемой ими катодной плазмы [3—7]. В этом случае КП выстраиваются преимущественно вдоль силовых линий магнитного поля и перемещаются поперек поля в ретроградном (т. е. в противоположном направлении действия силы Ампера) направлении. При этом скорость перемещения групп КП по поверхности катода увеличивается с ростом индукции магнитного поля B_{\perp} и может достигать десятков метров в секунду.

Динамика токнесущего потока катодной плазмы определяется совместным действием силы Лоренца и холловского электрического поля, которые направлены в противоположные стороны. Согласно [3, 4], холловская сила $F_h = ze v_i B_{\perp} I_c / I_i$ значительно превышает силу Лоренца $F_l = ze v_i B_{\perp}$ и не зависит от тока дуги. Здесь ze и v_i — средний заряд и скорость ионов, соответственно, I_c и I_i — электронный и ионный токи (для медных электродов $I_c / I_i \approx 10$). Результирующая сила приводит к изгибу плазмы в направлении действия силы Ампера на общий ток дуги.

Перенос тока в вакуумном промежутке с поперечным магнитным полем осуществляется в тонком слое на ретроградной стороне плазмы, в котором сосредоточена основная часть холловского поля [3, 8]. Эмитированные из катода ионы претерпевают отражения в этом слое, что и приводит к их отклонению в амперовом направлении.

В работе [3] определено пороговое значение индукции стационарного магнитного поля $B_1 = 0,034$ [Тл]/ d [см], при котором ионы не достигают анода, и вблизи поверхности анода образуется слой пространственного заряда, на котором резко возрастает напряжение.

Из известных литературных данных можно выделить два способа реализации вакуумного промежутка с поперечным магнитным полем.

В первом способе вакуумный промежуток состоит из полого цилиндрического анода и дискового катода с меньшим диаметром, расположенного на оси анода ниже его края [9—12]. На внешней стороне анода соосно размещается электромагнитная катушка, которая возбуждает в вакуумном промежутке аксиальное магнитное поле. Вблизи внутренней поверхности анода это поле направлено перпендикулярно току. В скрещенном электрическом и магнитном полях в прианодной области генерируется кольцевой холловский ток, который способствует отжиму плазмы от анода и тем самым увеличению напряжения на вакуумном промежутке [9].

Второй, более традиционный, на наш взгляд, способ осуществляется путем возбуждения практически однородного магнитного поля перпендикулярно оси вакуумного промежутка, который состоит из двух дисковых контактов, один из которых подвижный [3, 4, 13, 14]. Магнитное поле возбуждается с помощью двух соосных катушек, расположенных по бокам вакуумного промежутка. В таком промежутке отклонение ионов от анода может быть обусловлено действием рассмотренного выше [3, 4] холловского электрического поля. С другой стороны, в [14] отмечается превалирующее влияние силы Лоренца на динамику ионов в однородном магнитном поле.

Во всех этих вакуумных промежутках был продемонстрирован эффект нарушения устойчивости горения сильноточной вакуумной дуги при наложении импульсного магнитного поля.

В настоящей работе исследована устойчивость горения вакуумной дуги в осесимметричном радиальном магнитном поле, которое формируется электромагнитной катушкой, расположенной соосно с дисковыми электродами на минимально возможном расстоянии от поверхности одного из электродов.

Вакуумный промежуток с осесимметричным магнитным полем

Вакуумный промежуток (ВП) с магнитным полем состоит из двух основных дисковых электродов, узла поджига с управляющим электродом и электромагнитной катушки, размещенной на внешней стороне одного из электродов (рис. 1). Электродная система ВП, размещенная в отпаянном герметизированном корпусе, выполнена из безкислородной меди и рассчитана на длительное пропускание тока до сотен ампер. Минимальный междуэлектродный зазор между основными электродами $d = 3$ мм. Дуга в промежутке инициируется путем подачи управляющего импульса на узел поджига, расположенный в центре противоположного относительно катушки электрода. Изоляция ВП рассчитана на напряжение до 20 кВ.

Катушка с внутренним радиусом 15 мм, содержащая 180 витков, предназначена для формирования в рабочем зазоре между основными электродами осесимметричного магнитного поля. Расстояние от торца катушки до поверх-

ности противоположного электрода составляет ~ 20 мм. На этой поверхности аксиальная составляющая индукции магнитного поля B_z максимальна ($B_{zm} \approx 570$ мТл/кА) вблизи оси вакуумного промежутка и плавно спадает с увеличением радиуса. Радиальная составляющая индукции магнитного поля B_r с увеличением радиуса возрастает от нуля до максимального значения $B_{rm} \approx 260$ мТл/кА при $r = 20-25$ мм и затем плавно уменьшается за пределами электрода. При $r = 25$ мм аксиальная и радиальная составляющие индукции магнитного поля примерно равны. Приведенные значения индукции магнитного поля рассчитаны без учета вихревых токов в электродах ВП.

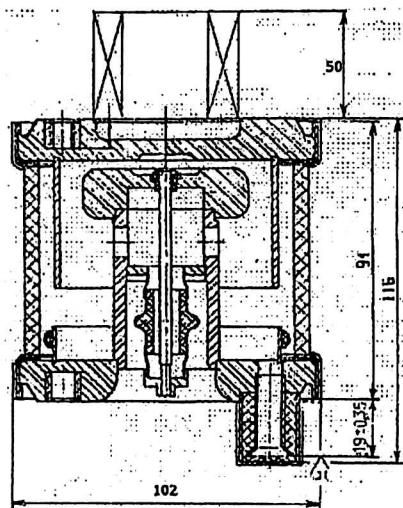


Рис. 1. Вакуумный промежуток с магнитным полем

Питание катушки осуществляется от внешнего импульсного источника тока, содержащего конденсаторную батарею емкостью $C_k = 1,2$ мФ на напряжение до 1 кВ (рис. 2). Подключение источника питания к катушке осуществлялось с помощью управляемого вакуумного разрядника Р. При напряжении источника 900 В в катушке протекает импульс тока с амплитудой $I_k \sim 600$ А и длительностью ≥ 2 мс. Так как катушка установлена с внешней стороны электрода (см. рис. 1), то вследствие эффекта экранирования магнитное поле в межэлектродной области будет ослаблено и сдвинуто во времени относительно поля без экрана. По нашим оценкам, при длительности импульса тока в катушке ~ 2 мс индукция магнитного поля в рабочей области вакуумного промежутка ослабляется примерно в 2,8 раза, а фазовый сдвиг составляет ~ 1 мс.

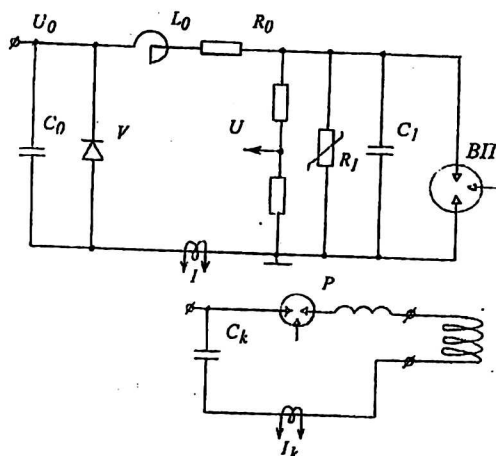


Рис. 2. Схема испытаний

Результаты исследований

Исследования отключающей способности вакуумного промежутка с радиальным магнитным полем проводились на импульсном стенде (см. рис. 2), содержащем батарею конденсаторов $C_0 = 12,4$ мФ на максимальное напряжение $U_0 = 3$ кВ, шунтированную диодным блоком V , и реактор $L_0 = 0,5-6$ мГн. Ток в цепи разрядного контура ограничивался с помощью резистора $R_0 = 5-10$ Ом. Параллельно ВП был подсоединен нелинейный резистор R_1 для ограничения перенапряжения до заданного уровня. В целях ограничения скорости восстанавливающегося на ВП напряжения в некоторых опытах параллельно разряднику подключалась емкость $C_1 = 5$ мкФ.

В каждом цикле измерений регистрировались ток в катушке, ток в цепи разрядного контура и напряжение на ВП. Импульс тока в катушку подавался с задержкой 4–20 мс относительно начала протекания тока через ВП. Измерения проводились в диапазоне токов 40–500 А при различном направлении тока в вакуумном промежутке (катушка на аноде или на катоде разрядника) и тока в катушке.

Из результатов измерений при $C_1 = 0$, $L_0 = 0,5$ мГн и $R_0 = 10$ Ом следует, что устойчивость горения вакуумной дуги: практически не зависит от направления тока в катушке и времени задержки включения катушки и определяется в основном индукцией магнитного поля и направлением тока в ВП.

В случае поджига на аноде (катушка расположена на катоде) вакуумная дуга сохраняет свою устойчивость в течение времени $t_D = t_2 - t_1 \sim 2-6$ мс после включения магнитного поля (рис. 3, а). В этой фазе напряжение на дуге увеличивается до ~40 В. Затем дуга переходит в неустойчивую фазу с заметными всплесками напряжения и попытками обрыва тока вплоть до полного погасания дуги. Длительность неустойчивой фазы $t_H = t_{от} - t_2 \sim 0,5-3$ мс. Характерно, что погасание дуги в этом режиме наблюдается, как правило, уже при отсутствии магнитного поля в вакуумном промежутке.

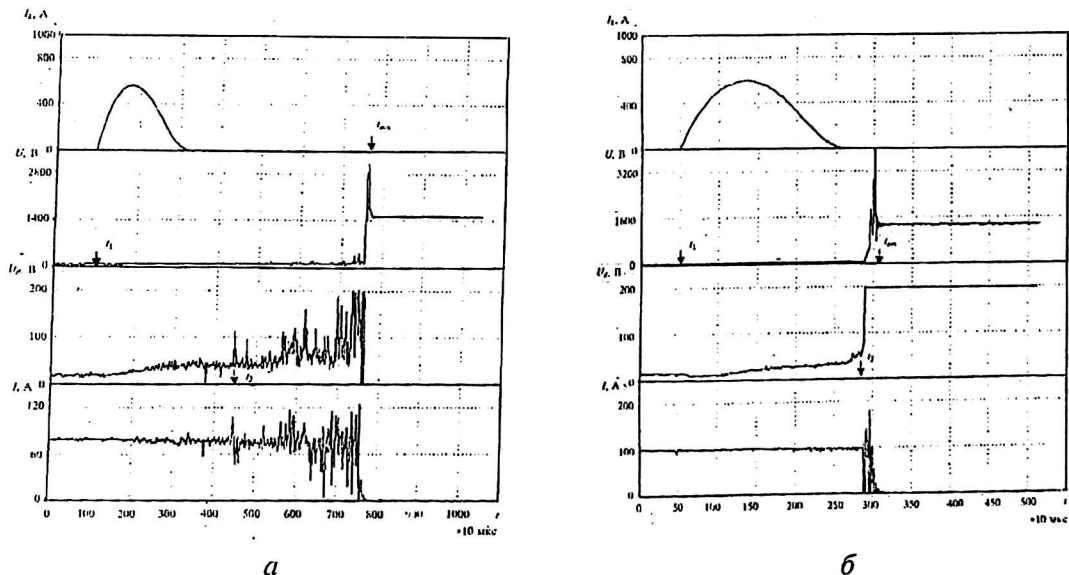
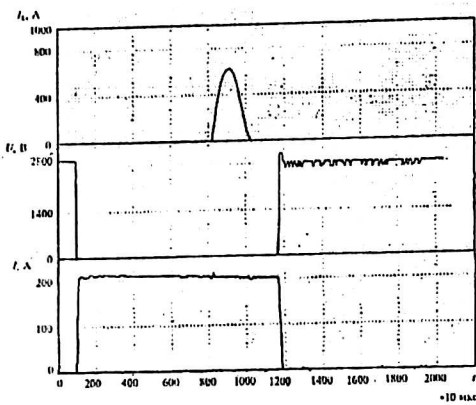
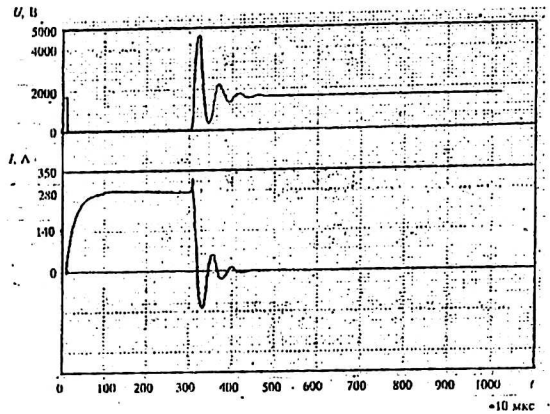


Рис. 3. Осциллограммы тока в катушке (I_k), напряжения на ВПМ U , напряжения на дуге U_0 и тока I :
а — при поджиге на аноде, $C_1 = 0$; б — при поджиге на катоде, $C_1 = 0$;



а



б

Рис. 3. Окончание:

а — при поджиге на катоде, $C_1 = 5$ мкФ;
 б — при питании катушки основным током, поджиге на катоде, $C_1 = 5$ мкФ

При поджиге на катоде длительность устойчивой фазы горения вакуумной дуги составляет $t_d \sim 1-3$ мс, а затем наблюдается быстрое нарастание напряжения на ней и отключения тока за $t_{н} \sim 0,1-0,3$ мс (см. рис. 3, а). При токе 50 А полное время отключения $t_{от}$ относительно начала импульса тока в катушке уменьшается примерно в два раза при увеличении B_{pm} от 35 до 50 мТл. Минимальное время отключения составляло $t_{от} \sim 1,5$ мс и увеличивалось с ростом тока.

Максимальный отключаемый ток, зарегистрированный в этом цикле измерений, составлял $\sim 80-100$ А при максимальной индукции радиальной составляющей магнитного поля $B_{pm} \sim 50-60$ мТл. При более высоких значениях тока после попытки отключения, которая проявляется на осциллограммах в виде нескольких всплесков напряжения и кратковременных спадов тока, дуга снова становится устойчивой и горит, пока ток не спадет до значения тока среза $\sim 5-15$ А, присущего данному вакуумному промежутку.

В следующем цикле измерений параллельно ВП подсоединялась емкость $C_1 = 5$ мкФ. Опыты проводились при напряжении U_0 до 3 кВ и $R_0 = 10$ Ом. В этом случае ВП надежно отключал ток до 200 А (максимальный отключаемый ток 240 А при $B_{pm} \sim 50-60$ мТл). Типичные осциллограммы токов и напряжения представлены на рис. 3, б. Среднее время отключения составило $t_{от} = 2,6$ мс при десяти пусках.

В заключительном цикле измерений катушка была подключена последовательно с ВП таким образом, что через катушку протекал отключаемый ток. В этом случае эффект ослабления магнитного поля должен проявляться только на фронте импульса тока, и полная задержка времени формирования поля в междуэлектродном промежутке будет не более 2 мс. В данном цикле измерений удалось увеличить ток, отключаемый ВП, до 300 А при $B_{pm} \sim 70-80$ мТл. Типичные для этого режима ($U_0 \sim 2$ кВ, $R_0 = 5$ Ом) осциллограммы тока и напряжения представлены на рис. 3, а. Максимум восстанавливающегося напряжения составляет ~ 5 кВ. Среднее из десяти пусков время отключения $t_{от}$ относительно начала тока в ВП составляет 3,6 мс. В этом же режиме были проведены измерения при $L_0 = 6$ мГн. Максимальный отключаемый ток составил ~ 300 А при среднем времени отключения $t_{от} = 4,6$ мс. Восстанавливающееся напряжение ограничивалось на уровне 8-9 кВ с помощью

нелинейного резистора R_1 . На рис. 4 представлена зависимость отключаемого тока от индукции магнитного поля, полученная из анализа всех циклов измерений при $C_1 = 5$ мкФ, из которой видно, что отключаемый ток увеличивается с ростом индукции радиального магнитного поля.

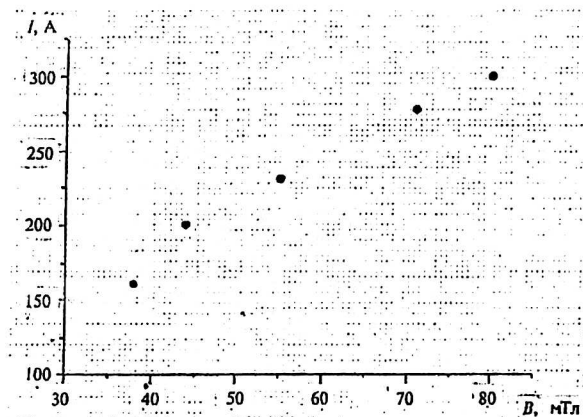


Рис. 4. Зависимость тока отключения от индукции радиального магнитного поля

Обсуждение результатов

Как известно, КП в сильноточном вакуумном разряде образуют расширяющееся кольцо с центром в месте инициирования [7]. В условиях наших экспериментов можно предположить, что примерно через 2–3 мс кольцо КП достигнет периферии катодного электрода и вследствие устойчивого характера горения вакуумной дуги без внешнего магнитного поля будет оставаться в этой области вплоть до окончания импульса тока. Таким образом, включение внешнего магнитного поля происходило при уже сформированной структуре кольца КП.

В дальнейшем предполагается, что под действием радиальной составляющей магнитного поля КП вместе с генерируемой ими плазмой начинают вращаться по окружности в ретроградном направлении, а плазменные потоки изгибаются вблизи поверхности анода в прямом амперовом направлении. В результате в прианодной области вакуумного промежутка индуцируется азимутальный кольцевой холловский ток, направление которого зависит от направлений тока в катушке и основного тока.

Аксиальная составляющая магнитного поля определяет область локализации кольцевого холловского тока при длительном горении вакуумной дуги. Так, в работе [15] показано, что при размещении катушки на аноде на кольцевой ток действует радиальная сила, приводящая к стягиванию токового кольца к оси электродной системы. Напротив, при размещении катушки на катоде токовое кольцо должно расширяться к области устойчивого равновесия, где аксиальная составляющая магнитного поля изменяет направление ($B_z = 0$). Характерно, что расположение области устойчивого равновесия не зависит от направления тока в катушке и определяется только направлением тока дуги.

Взаимодействие холловского тока с радиальным магнитным полем может привести к отжиму плазмы от анода и образованию анодного слоя. Условие образования анодного слоя пространственного заряда, как и в случае однородного магнитного поля [3], будет определяться индукцией радиальной со-

ставляющей магнитного поля и не зависит от направления тока в катушке и тока дуги. Это явление сопровождается резким скачком напряжения, что создает условие для отключения тока.

Результаты наших опытов качественно не противоречат изложенным выше физическим процессам, определяющим устойчивость горения вакуумной дуги в осесимметричном магнитном поле. Так, в режиме поджига на аноде при наложении магнитного поля плазменные каналы должны раскручиваться за границу анодного электрода и могут выйти на боковые поверхности электродов, где дуга должна гореть неустойчиво и при отсутствии внешнего магнитного поля. При поджиге на катоде дуговые каналы, закручиваясь к оси электродной системы, могут достигать внутреннего края на катоде, где междуэлектродное расстояние увеличивается до $d \sim 5-7$ мм (см. рис. 1). По нашему мнению, в той области реализуются условия образования устойчивого анодного слоя, о чем свидетельствует резкое увеличение напряжения на вакуумном промежутке, приводящее к отключению тока. Заметим, что в этом режиме поток катодной плазмы движется к аноду в нарастающем радиальном магнитном поле. Временной интервал между началом приложения поля и образованием анодного слоя при сравнительно малых токах $\sim 40-50$ А составляет $\sim 1,5-3$ мс и уменьшается с увеличением B_r , что свидетельствует об увеличении подвижности КП с ростом магнитного поля.

Как и следовало ожидать, подключение параллельно вакуумному промежутку емкости $C_1 = 5$ мкФ заметно повышает надежность отключения тока. Так, при $B_r \sim 30-40$ мТл происходило надежное отключение тока $I \sim 40-150$ А, причем с его увеличением в пределах этого диапазона наблюдалось возрастание времени t_d устойчивого горения дуги в магнитном поле, определяемое до момента резкого повышения напряжения на вакуумном промежутке. Данное явление может быть обусловлено уменьшением подвижности КП вследствие их группирования или увеличением времени формирования анодного слоя. С увеличением тока $I > 150$ А быстро возрастает вероятность отказов отключения его вследствие повторных пробоев вакуумного промежутка. Если такой пробой происходит в области, где радиальное поле минимально, то дуга будет гореть устойчиво вплоть до окончания импульса тока. Ток $I = 150-160$ А можно определить как ток среза для данного вакуумного промежутка с радиальным магнитным полем $B_r \sim 30-40$ мТл. При этом плотность тока на аноде $j \sim I/\pi d^2 \sim 100/N$ А/см², где N — число КП, $d = 0,7$ см. Отметим, что минимальное значение индукции радиального поля, при которой происходит отключение тока ≤ 160 А, сравнимо с результатами работы [3] для статического однородного поперечного магнитного поля. Для отключения более высоких значений тока вплоть до 300 А потребовалось увеличить поле до $B_r \sim 70-80$ мТл. Полученная зависимость отключаемого тока от B_r не укладывается в рамки рассмотренных выше процессов и может быть обусловлена увеличением плотности тока на аноде с ростом тока дуги. Возможность повышения вероятности отключения тока путем уменьшения плотности тока на аноде в вакуумном промежутке с поперечным магнитным полем отмечалась практически во всех предыдущих работах [4, 9].

Заключение

В представленном цикле исследований устойчивости горения вакуумной дуги в осесимметричном магнитном поле продемонстрирована возможность эффективного отключения постоянного тока до 300 А при сравнительно ма-

лой индукции радиального магнитного поля 70—80 мТл. Предложено качественное описание процесса нарушения устойчивости горения вакуумной дуги, которое не противоречит полученным экспериментальным данным. Исследованная схема вакуумного промежутка представляется перспективной для разработки вакуумных выключателей постоянного тока.

Литература

1. Вакуумные дуги. Теория и приложения/Под ред. Дж. Лафферти. —М.: Мир, 1982. С. 428.
2. Воздвиженский В. А., Гончаров А. Ф., Козлов В. Б. и др. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Emtage P. R., Kimblin C. W. et al. //IEEE Trans. Plasma Sci. 1980. V. PS-8. № 4. P. 314—319.
4. Kimblin C. W. et al.//EPRI Final Report EL-1221 on Project 564-3, Oct. 1979.
5. Drouet M. G.//IEEE Trans. Plasma Sci., 1985. V. PS-13. № 5. P. 235—241.
6. Meunier J. L., Drouet M. J.//Ibid. 1983. V. PS-11. № 3. P. 165—168.
7. Перский Н. Е., Сысун В. И., Хромой Ю. Д.//ГВТ. 1989. Т. 27. № 6. С. 1060—1067.
8. Бендер Е. Д., Кривенко А. С. // Прикладная физика. 1999. № 5. С. 33—42.
9. Dethlefsen R., Mylius J. // EPRI EL-1187, RP 993-2, Final Report, September, 1979.
10. Dettman D. R., Nikolich M.//Arlington Proc. of 5 IEEE Pulsed. Power Conf., Arlington, June, 1985. P. 70—73.
11. Pedrow P. D., Burrage L. M., Shohet J. L.//IEEE Trans. on Power. Apparatus and Syst., 1983, V. Pas-102. № 5. P. 1269—1277.
12. Кузьмичев А. И. и др.//Вестн. Киевск. политехн. ин-та. Сер. Радиоэлектрон., 1986. № 23. С. 117—120.
13. Bartosik M.//Proc. Of XVIIth ISDEIV, Berkeley, July, 1996. P. 355—359.
14. Klajn A.// IEEE Trans. Plasma Sci., 1999. V. PS-27. № 4. P. 977—983.
15. Воронин А. В., Русаков А. И., Семенов А. А.//ЖТФ. 1995. Т. 65. № 4. С. 20—30.

Stability of dc vacuum arc burning in the radial axisymmetrical magnetic field

D. F. Alferov, V. P. Ivanov, V. A. Sidorov
The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

Stability of dc vacuum arc burning in the radial axisymmetrical magnetic field created by the electromagnetic coil placed under one of the disk electrodes of the triggered vacuum gap is investigated. It is shown, that the chopper current of vacuum arc is increased up to 300 A with induction of a radial component of magnetic field 70—80 mT. The probable physical processes interfering stability of a vacuum arc in a radial magnetic field are considered.