

УДК 621.387.35

## Распределение магнитного поля в вакуумном управляемом разряднике со стержневой системой электродов при горении дуги в межстержневых зазорах

Д. Ф. Алферов, И. А. Лукацкая, С. М. Селикатова, В. А. Сидоров  
ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", Москва, Россия

*Рассчитано магнитное поле в вакуумном управляемом разряднике со стержневой системой электродов на стадии развития разряда, когда дуга горит в межстержневых зазорах. Исследовано распределение тангенциальной  $B_t$ , радиальной  $B_r$  и вертикальной  $B_z$  составляющих индукции магнитного поля в цилиндрической системе координат. Показано, что успешное функционирование разрядника на стадии развития разряда так же, как и в начальной стадии, когда дуга горит вблизи узла поджига, обеспечивается составляющими  $B_t$  и  $B_r$ , обусловленными протеканием тока разряда в стержневых электродах.*

Вакуумные управляемые разрядники находят широкое применение в мощных высоковольтных электрофизических установках и электроразрядных технологиях. Особенно хорошо зарекомендовали себя разрядники со стержневой системой электродов. Разрядники этого типа разработаны для широкого диапазона токов 0,1–500 кА и напряжений 1–50 кВ [1, 2]. Стержневая система электродов представляет собой ряд чередующихся стержней анодов и катодов, расположенных по окружности и закрепленных на анодном и катодном держателях (рис. 1).

Сверхскоростное фотографирование [2, 3] показало, что развитие вакуумной дуги в разряднике проходит ряд стадий. На первой (начальной) стадии, когда ток разряда не превышает 5–8 кА, дуга горит вблизи узла поджига между держате-

лем катодных стержней и одним или несколькими торцами анодных стержней. По мере увеличения тока в течение импульса разряд переходит в следующие стадии, когда дуга возникает в межстержневых зазорах: сначала в одном из них, а при дальнейшем увеличении тока — и в остальных. При этом катодные пятна размножаются и распространяются вдоль всей поверхности катодных стержней, появляются и анодные пятна. В это время дуга между держателем катодных стержней и торцами анодных стержней погасает [2, 3].

Такое развитие разряда в разряднике в значительной степени обусловлено распределением магнитного поля в стержневой системе электродов, так как магнитное поле существенно влияет на свойства вакуумной дуги. Как показано в ра-

боте [4], продольное магнитное поле, параллельное току дуги, при величине индукции более 1,5 мТл/кА стабилизирует вакуумную дугу: приводит к уменьшению падения напряжения на дуге и увеличению порогового тока образования анодного пятна. В поперечном магнитном поле при токе более 10 кА и величине индукции магнитного поля 6–7 мТл/кА вакуумная дуга приходит в движение [5, 6]. Причем катодная область в виде катодных пятен движется в направлении, противоположном действию силы Ампера (эффект обратного движения катодного пятна), а анодная область приобретает вид светящейся дорожки, удлиняющейся в направлении силы Ампера. С увеличением произведения индукции магнитного поля на ток дуги происходит скачкообразное смещение всей катодной области в сторону действия силы Ампера. В итоге при вышеназванных условиях канал вакуумной дуги расширяется.

Исследования [7] распределения магнитного поля в начальной стадии разряда показали, что уже на этой стадии в межстержневых зазорах создается магнитное поле: продольное и поперечное, более благоприятное для существования дуги, чем вблизи узла поджига, что может способствовать переходу дуги в межстержневые зазоры.

В настоящей работе рассчитано распределение магнитного поля в разряднике при горении дуги в межстержневых зазорах. Исследовано влияние составляющих индукции магнитного поля на развитие сильноточной вакуумной дуги в разряднике со стержневой системой электродов.

### Объект и методика исследования

Исследовалось распределение магнитного поля в разряднике РВУ-43 [1–3] с шестистержневой системой электродов. Для удобства расчета выбраны цилиндрические стержневые электроды. Расчет производился с помощью программы [8] по закону Био и Савара путем суммирования индукции, создаваемой элементарными постоянными токами. Использовалась цилиндрическая система координат, в которой  $\varphi$ - и  $r$ -полярные координаты: угол и радиус проекции точки на плоскость  $xu$ ,  $z$  — аппликата, равная расстоянию этой точки от плоскости  $xu$ . Схематическое изображение разрядника и система координат приведены на рис. 1, где  $R = 3$  см — радиус окружности, на которой расположены оси стержневых электродов,  $r_0 = 1$  см — радиус стержневых электродов. Рассчитывались следующие составляющие индукции магнитного поля: тангенциальная  $B_t$ , перпендикулярная радиусу, радиальная  $B_r$ , направленная вдоль радиуса, и вертикальная  $B_z$ , направленная вдоль оси  $z$ . В расчетах не учитывались токи во фланцевых тоководах, так как они не оказывают влияния на величину  $B$ . Принималось, что ток равен 1000 А и направлен от анода к катоду. Исследовались три стадии дуги: вторая, когда дуга горит в одном зазоре между анодным стержнем  $A$  и катодным  $E$  (см. рис. 1), третья, когда дуга горит в двух зазорах между анодным стержнем  $B$  и катодными стержнями  $E$  и  $F$ , и четвертая, когда дуга горит во всех межстержневых зазорах. Во второй стадии ток в дуге составлял 1000 А, в третьей — 1000/2 А, в четвертой — 1000/6 А. Дуга имитировалась прямолинейным проводником с квадратным сечением площадью 1 см<sup>2</sup>. Начальное и конечное сечения канала дуги располагались в плоскостях  $xz$ , смещенных относительно осей стержневых электродов на 20° и касательных к поверхности стержней. Центры начального и конечного сечений имели координаты

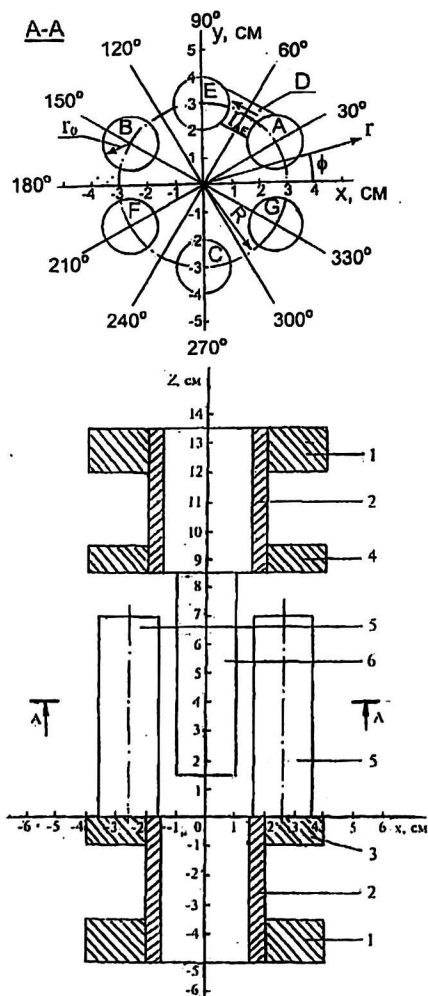


Рис. 1. Схематическое изображение разрядника и система координат:

1 — фланцевые тоководы; 2 — цилиндрические тоководы; 3, 4 — держатели анодов и катодов, соответственно; 5, 6 — стержневые электроды;  $A, B, C$  — аноды,  $E, F, G$  — катоды,  $D$  — дуга, в которой протекает ток  $I$ , узел поджига расположен на катоде (на рис. 1 не показан)

наты  $r = 3,53$  см и  $z = 5,5$  см. Они располагались ближе к торцам анодов, чем катодов. Такой выбор сделан в связи с тем, что распространение дуги в межстержневом зазоре происходит, как правило, от торцов анодов к торцам катодов [2, 3].

### Результаты исследований и их обсуждение

#### Тангенциальная составляющая индукции магнитного поля $B_t$

Составляющая индукции магнитного поля  $B_t$  образует продольное магнитное поле по отношению к дуге в межстержневых зазорах. Поэтому она стабилизирует дугу. Анализ результатов расчета показал, что в области расположения дуг и в их окрестностях величина  $B_t$  определяется током в стержневых электродах. Вклад в величину  $B_t$  от протекания тока в других элементах разрядного контура не превышает 10 %. Расчетные зависимости  $B_t(\varphi)$  в плоскости, перпендикулярной оси  $z$ , в которой расположено центральное продольное горизонтальное сечение каналов дуг ( $z = 5,5$  см) для второй, третьей и четвертой стадий разряда, приведены на рис. 2.

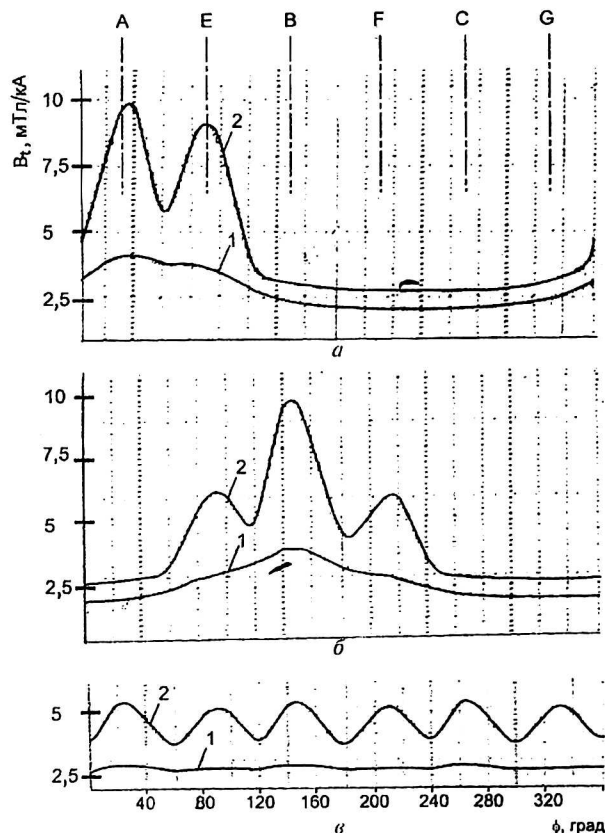


Рис. 2. Зависимость  $B_t(\varphi)$  при горении дуги в межстержневых зазорах:

$z = 5,5$  см; 1 —  $r = 6$  см; 2 —  $r = 4$  см; A, B, C и E, F, G — положение осей анодов и катодов, соответственно: а — вторая стадия, дуга между анодом A и катодом E; б — третья стадия, дуга между анодом B и катодами E и F; в — четвертая стадия, дуга во всех межстержневых зазорах

Из рис. 2 видно, что величина  $B_t$  при  $r = 4$  см достигает максимальных значений при координатах  $\varphi$ , соответствующих положению осей стержневых электродов. Число максимумов  $B_t$  в каждой стадии разряда равно числу стержневых электродов, по которым протекает ток. В третьей стадии разряда абсолютное значение  $B_{t\max}$  в плоскости  $zr$  с координатой  $\varphi = 150^\circ$ , в которой расположена ось анодного стержня B, больше, чем в плоскостях  $zr$  с координатами  $\varphi = 90$  и  $210^\circ$ , в которых расположены оси катодных стержней E и F, так как в анодном стержне B протекает в два раза больший ток — 1000 А, чем в катодных стержнях E и F — 500 А. В четвертой стадии разряда  $B_{t\max}$  в плоскости  $zr$ , в которой расположены оси анодных стержней, несколько превышает  $B_{t\max}$  в плоскостях  $zr$ , в которых расположены оси катодных стержней. Это вызвано тем, что участки анодных стержней, по которым протекает ток, имеют большую длину (5,5 см), чем соответствующие участки катодных стержней (3 см). Имеет место спад величины  $B_{t\max}$  при переходе дуги из одной стадии в другую, так как при этом уменьшается ток, приходящийся на каждый стержневой электрод. На рис. 3, а приведены зависимости  $B_t(r)$  для второй и четвертой стадий разряда посередине межстержневых зазоров, в которых горит дуга, на расстоянии 0,5 см ( $z = 4,5$  см) от нижних границ каналов дуг. Там же нанесены точки для первой (начальной) стадии разряда для первого и второго случаев, когда дуга горит в промежутке между держателем катодных стержней и торцом анодного стержня A или всеми торцами анодных стержней A, B, C, соответственно [7]. Из рис. 3, а видно, что посередине межстержневых зазоров, в которых горит дуга,  $B_t$  во второй стадии разряда совпадает с  $B_t$  для первой стадии в первом случае, а  $B_t$  в четвертой стадии совпадает с  $B_t$  для первой стадии во втором случае. И это несмотря на то, что ток через дугу переходит из анодных стержней в катодные. Это объясняется одинаковым удалением в этих стадиях разряда плоскостей  $zr$ , проходящих посередине межстержневых зазоров, от анодных и катодных стержней, а также одинаковыми токами в них и совпадением направления  $\dot{y}$  составляющих  $B_t$ , обусловленных этими токами. Однако за пределами указанных плоскостей  $zr$  значения  $B_t$  в начальной и последующих стадиях отличаются. Так, в начальной стадии градиент  $dB_t/d\varphi$  сохраняет знак при изменении  $z$  вдоль всего межстержневого зазора, а в последующих стадиях  $dB_t/d\varphi$  имеет разные знаки по обе стороны от дуги (см. рис. 3, б). Это связано с прекращением тока в анодном стержне A и появлением тока в катодном стержне E при  $z = 5,5$  см. В четвертой

стадии разряда, когда ток протекает по всем стержневым электродам (как видно из рис. 3, а),  $B_r$  вытесняется из внутреннего объема стержневой системы электродов, свойства которой в этом случае подобны полому цилиндру. Данный результат согласуется с наблюдаемой в работе [3] локализацией дуги преимущественно вблизи внешней границы рабочей области межстержневого зазора.

следовательно, стабилизация вакуумной дуги происходит при меньших токах разряда. Данное обстоятельство позволяет объяснить более низкое падение напряжения на дуге в разряднике с меньшим значением  $R$  при одном и том же токе [2].

Возможность распространения дуги вдоль межстержневых зазоров, в которых она горит, и ее перехода в соседние зазоры зависит от величины  $B_r$  в окрестностях дуги. На рис. 3, б приведены зависимости  $B_r(z)$  посередине межстержневых зазоров, в которых горит дуга, для второй, третьей и четвертой стадий разряда, а в табл. 1 — значения  $B_r$  в соседних межстержневых зазорах. Из рис. 3, в и табл. 1 видно, что во всех случаях в окрестностях дуги величина  $B_r$  превышает значение 1,5 мТл/кА, начиная с которого происходит стабилизация вакуумной дуги. Это означает, что протекание тока по стержневым электродам создает в окрестностях дуги благоприятные условия для ее распространения по межстержневому зазору и перехода в соседние зазоры.

Таблица 1

Значения  $B_r$  в межстержневых зазорах, соседних с теми, в которых горит дуга

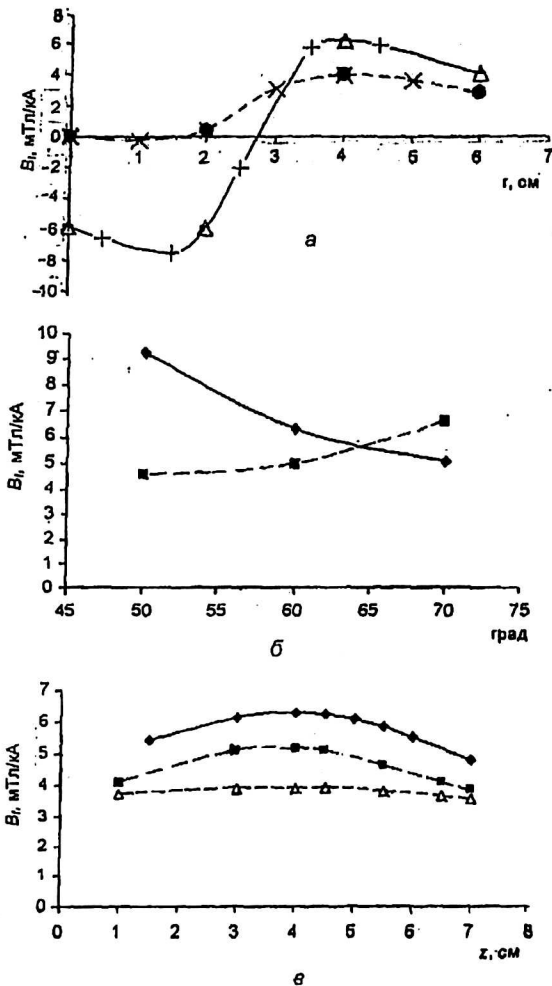
Стадия разряда	$\varphi$ , град	$B_r$ , мТл/кА
2	0	4
2	120	4
3	50	3
3	240	3

Отметим, что наличие в межстержневом зазоре продольной относительно тока дуги составляющей магнитного поля  $B_r > 1,5$  мТл/кА объясняет и существенное повышение порогового тока образования анодного пятна в стержневой электродной системе [3] по сравнению с традиционными дисковыми контактами без магнитного поля.

**Радиальная составляющая индукции магнитного поля  $B_r$**

Анализ расчетных данных показал, что  $B_r$  определяется токами, протекающими в стержневых электродах и дуге. Для выяснения влияния на  $B_r$  токов в каждом из этих элементов разрядного контура проводился расчет составляющей  $B_r$ , обусловленной током только в одном из этих элементов. На рис. 4 представлены зависимости  $B_r(\varphi)$  во второй стадии развития разряда для случаев протекания тока только в дуге (см. рис. 4, а, б) или только в стержневых электродах (см. рис. 4, в, г).

Зависимости  $B_r(\varphi)$ , обусловленные только током дуги, рассчитаны вблизи верхней (рис. 4, а,  $z = 5$  см) и нижней (см. рис. 4, б,  $z = 6$  см) границ канала дуги для радиуса  $r = 3$  см, вблизи которого проходит центральное вертикальное



**Рис. 3. Зависимости  $B_r(r, \varphi, z)$  в межстержневых зазорах:**  
 а —  $B_r(r)$  при  $z = 4,5$  см и  $\varphi = 60^\circ$ : + — первая стадия разряда, когда дуга горит между держателем катода и торцом одного из анодов; × — первая стадия разряда, когда дуга горит между держателем катода и торцами всех анодов;  
 Δ — вторая стадия разряда, когда дуга горит между стержнями А и Е; • — четвертая стадия разряда, когда дуга горит во всех межстержневых зазорах ( $\varphi = 240^\circ$ );  
 б —  $B_r(\varphi)$  при  $r = 4$  см: вторая стадия разряда ♦ —  $z = 4$  см, ■ —  $z = 7$  см;  
 в —  $B_r(z)$  при  $r = 4$  см, значения  $\varphi$  соответствуют середине межстержневого зазора: ♦ — вторая стадия разряда,  $\varphi = 60^\circ$ , ■ — третья стадия разряда, когда дуга горит между анодным стержнем В и катодными стержнями Е и F; Δ — четвертая стадия

С уменьшением радиуса  $R$  стержневой системы электродов тангенциальная составляющая  $B_t$  в межстержневом зазоре увеличивается [9] и,

продольное сечение канала дуги. Из рис. 4, а, б видно, что абсолютные значения  $B_r$ , обусловленные током дуги, достигают максимальных величин в плоскости  $zr$ , проходящей посередине межстержневого зазора ( $\varphi = 60^\circ$ ), в которой расположено центральное поперечное сечение канала дуги. По обе стороны от дуги вдоль оси  $z$  на ее границах составляющие  $B_r$  имеют одинаковые абсолютные значения и направлены противоположно. На аноде и катоде у оснований канала дуги ( $\varphi = 50$  и  $70^\circ$ )  $B_r$  падает на 40 %. Такое распределение  $B_r$  в плоскости, проходящей через центральное поперечное сечение дуги, обусловлено общей закономерностью, имеющей место для прямолинейного проводника конечной длины, по которому протекает ток.

$B_r$  также резко падает вне дуги при удалении от ее оси вдоль  $r$  и  $z$ . При переходе дуги в третью и четвертую стадии абсолютные значения  $B_{r\max}$ , обусловленные током дуги, уменьшаются пропорционально этому току.

В результате взаимодействия тока дугового канала с собственным магнитным полем (составляющими индукции магнитного поля  $B_r$  и  $B_z$ , вызванными током дуги) создаются силы, направленные к оси дуги. Эти силы при определенных условиях могут вызвать сжатие канала (пинч-эффект) в его середине и вблизи анодного стержня. В катодной области, напротив, взаимодействие катодных пятен с собственным магнитным полем тока дуги может привести к расширению канала дуги вследствие эффекта обратного движения катодных пятен в поперечном магнитном поле. Эти явления являются общими для сильноточной вакуумной дуги независимо от вида электродной системы. Составляющие индукции магнитного поля  $B_r$ , обусловленные током дуги, в идеализированном случае прямолинейного осесимметричного канала не могут вызвать движение дуги вдоль межстержневого зазора, так как по обе стороны от канала они равны по величине и имеют противоположное направление.

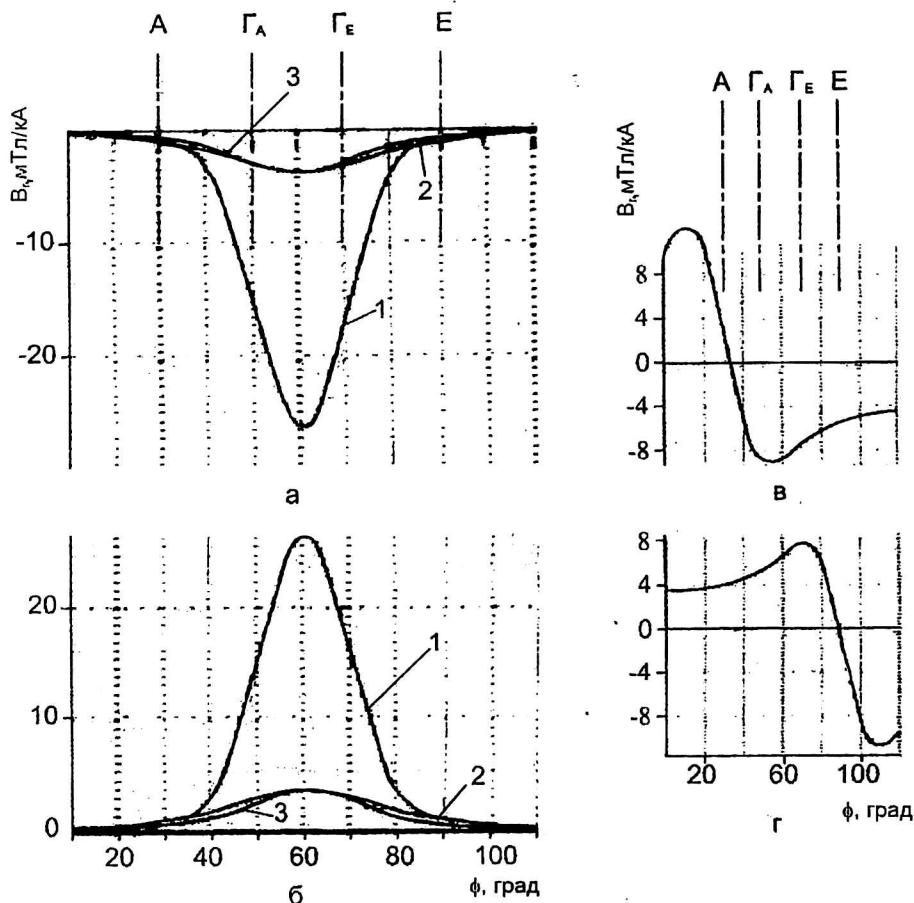


Рис. 4. Зависимости  $B_r(\varphi)$  в межстержневом зазоре. Вторая стадия разряда. А и Е — положения осей анода А и катода Е;  $\Gamma_A$  и  $\Gamma_E$  — положения границ межстержневого зазора со стороны анода А и катода Е:

а — ток протекает только в дуге;  $z = 5$  см; 1 —  $r = 3$  см; 2 —  $r = 2$  см; 3 —  $r = 4$  см; б — ток протекает только в дуге;  $z = 6$  см; 1 —  $r = 3$  см; 2 —  $r = 2$  см; 3 —  $r = 4$  см; в — ток протекает только в анодном стержне А на участке длиной 5,5 см и в катодном стержне Е на участке длиной 3 см;  $r = 2$  см;  $z = 4$  см; г — ток протекает только в анодном стержне А на участке длиной 5,5 см и в катодном стержне Е на участке длиной 3 см;  $r = 2$  см;  $z = 7$  см

Составляющие индукции магнитного поля  $B_r$ , создаваемые током в стержневых электродах, нарушают симметрию магнитного поля относительно оси дугового канала и могут вызвать его перемещение в межстержневом зазоре. Зависимости  $B_r(\varphi)$  приведены на рис. 4, *в, г* для областей, расположенных вне дугового канала, а именно, для радиуса  $r = 2$  см, соответствующего внутренней границе стержневой системы электродов, для плоскостей, перпендикулярных оси  $z$ , удаленных на расстояние 1 см от нижней (см. рис. 4, *в*,  $z = 4$  см) и верхней (см. рис. 4, *г*,  $z = 7$  см) границ канала дуги. Из рис. 4, *в, г* видно, что абсолютные значения  $B_r$ , формируемые током в стержневых электродах, достигают максимумов на границах межстержневых зазоров: у анода ( $\varphi = 50^\circ$ ) и катода ( $\varphi = 70^\circ$ ) — и падают при удалении от них. Причем по обе стороны от канала дуги ( $z = 4$  и  $7$  см)  $B_{r\max}$  имеют разные знаки. Наибольших абсолютных значений составляющая  $B_r$ , обусловленная током в стержневых электродах, достигает на радиусе  $r = 3$  см, на котором расположены оси стержневых электродов. Эти значения для второй стадии разряда посередине ( $r = 3$  см) нижней ( $z = 5$  см) и верхней ( $z = 6$  см) границ оснований дуги на аноде ( $\varphi = 50^\circ$ ) и на катоде ( $\varphi = 70^\circ$ ) приведены в табл. 2. Из табл. 2 видно, что наибольшие абсолютные значения  $B_r$  имеют место на нижней и верхней границах анодного ( $z = 5$  см,  $\varphi = 50^\circ$ ) и катодного ( $z = 6$  см,  $\varphi = 70^\circ$ ) оснований канала дуги соответственно. Абсолютные значения  $B_r$  резко спадают поперек основания канала как при изменении  $\varphi$ , так и в направлении оси  $z$ .

Таблица 2

Значения  $B_r$  во второй стадии разряда, обусловленные протеканием тока в стержневых электродах при  $r = 3$  см

Стадия дуги	$z$ , см	$\varphi$ , град	Полярность электрода	$B_r$ , мТл/кА
2	5	50	+	-15
	5	70	-	-2
2	6	50	+	1
	6	70	-	11

Значительные градиенты  $B_r(\varphi, z)$  по  $\varphi$  и по  $z$  вблизи границ дугового канала у его основания обусловлены тем, что в этой области ток дуги переходит из анодного стержня в катодный, и составляющая  $B_r$  изменяет знак. С удалением от границы канала магнитное поле в зазоре становится более однородным (см. рис. 4, *в, г*). Такое распределение поперечной составляющей магнитного поля в межэлектродном зазоре присуще также контактными системам, формирующим продольное магнитное поле в вакуумных дугогазительных камерах.

Исследования показали, что вблизи оснований дугового канала имеются некомпенсированные поперечные по отношению к току дуги составляющие индукции магнитного поля  $B_r$ , направленные у анода и у катода дуги в противоположные стороны. Их взаимодействие с током дуги вызывает усилия, направленные вдоль межстержневых зазоров также в противоположных направлениях. Как следует из табл. 2, наибольшие абсолютные значения  $B_r$  превышают величину индукции магнитного поля 6 мТл/кА [5, 6], при достижении которой дуга может начать двигаться.

На рис. 5 показано схематическое изображение пути тока  $I$  в стержневых электродах и дуге для второй стадии разряда и сил, действующих на дугу у анода  $F_A$  и у катода  $F_E$ , из которого видно, что эти силы направлены в противоположные стороны к торцам анода и катода. Такое направление сил может способствовать расширению занимаемой дугой области и ее перемещению вдоль межстержневого зазора. Наличие значительного поперечного магнитного поля за пределами первоначального канала способствует также и спонтанному размножению катодных пятен и образованию новых разрядных каналов вдоль оси  $z$  в межстержневом зазоре.

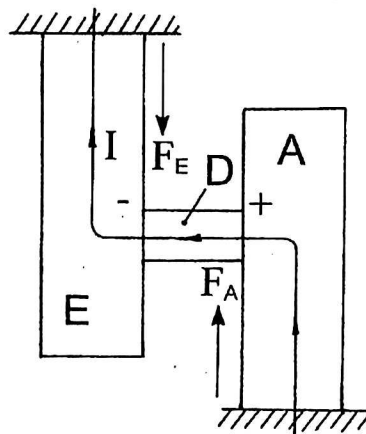


Рис. 5. Схематическое изображение пути тока  $I$  в аноде  $A$ , катоде  $E$  и дуге  $D$  и сил  $F_A$  и  $F_E$ , действующих на анодную и катодную части дуги

В третьей и четвертой стадиях разряда абсолютное значение составляющей  $B_{r\max}$ , обусловленной током в стержневых электродах, уменьшается пропорционально току, приходящемуся на соответствующий стержневой электрод. Как показано в [2, 3], распространение дуги вдоль межстержневого зазора происходит в основном во второй стадии, когда абсолютное значение  $B_{r\max}$  наибольшее. В последующих стадиях дуга удерживается в межстержневых зазорах благодаря стабилизирующему действию продольной по отношению к току дуги составляющей индукции магнитного поля  $B_r$ .

### Составляющая индукции магнитного поля $B_z$

Расчет показал, что составляющая  $B_z$  определяется в основном током в дуге. Некоторый вклад в  $B_z$  обусловлен протеканием токов в держателях 3, 4 (см. рис. 1) стержневых электродов, который становится заметным на уровне расположения их торцов. Токи в остальных частях разрядного контура, в том числе в стержневых электродах, не влияют на величину  $B_z$ . Очевидно, что составляющая индукции магнитного поля  $B_z$ , обусловленная током в дуге, подчиняется тем же закономерностям и имеет те же величины, что и  $B_r$ .

Составляющая индукции магнитного поля  $B_z$ , создаваемая протеканием тока в держателях 3 и 4 (см. рис. 1) анодных и катодных стержней, при взаимодействии с током дуги вызывает усилия, направленные по радиусу от оси стержневой системы. Однако ее величина далеко недостаточна для влияния на движение дуги в межстержневых зазорах. Действительно, как показано в [7], на уровне центрального продольного сечения канала дуги ( $z = 5,5$  см) она составляет во второй стадии 0,5 мТл/кА и практически равна 0 в четвертой стадии. Даже у торцов стержневых электродов значения  $B_z$ , равные для второй и четвертой стадий разряда 1,7 и 0,4 мТл/кА, соответственно, недостаточны для возникновения движения дуги.

### Заключение

Выполнено исследование распределения магнитного поля в вакуумном управляемом разряднике с шестистержневой системой электродов для трех стадий развития разряда: когда дуга горит в одном (вторая стадия), двух (третья стадия) и во всех шести межстержневых зазорах (четвертая стадия). В цилиндрической системе координат, в которой  $\varphi$  и  $r$  — полярные угол и радиус проекции точки на плоскость  $xu$ , а  $z$  — аппликата, рассчитаны тангенциальная  $B_r$ , радиальная  $B_r$  и вертикальная  $B_z$  составляющие индукции магнитного поля.

Из этих исследований можно сделать следующие выводы.

1. Составляющие индукции магнитного поля  $B_r$  и  $B_r$ , обеспечивающие необходимое функционирование вакуумных разрядников, создаются при протекании тока по стержневым электродам. Ток в других элементах разрядника существенного влияния на величины  $B_r$  и  $B_r$  не оказывает.

2. При протекании тока в дуге возникают составляющие собственного магнитного поля  $B_r$  и  $B_z$ , взаимодействие которых с током дуги имеет

общий характер для сильноточных вакуумных дуг при сравнительно больших межэлектродных зазорах. В идеализированном случае прямолинейного осесимметричного канала дуги эти составляющие не оказывают влияния на движение дуги в межстержневых зазорах. Абсолютные значения  $B_r$  и  $B_z$ , обусловленные током дуги, максимальны в плоскости  $zr$ , в которой находится центральное поперечное сечение канала дуги. Составляющая индукции  $B_r$ , вызванная током дуги, не превышает 4 % от  $B_r$  и  $B_z$ .

3. В первой стадии разряда, когда дуга горит между держателями катодных и торцами анодных стержней, и в последующих стадиях, когда дуга переходит в межстержневые зазоры, значения  $B_r$  в плоскостях  $zr$ , проходящих посередине межстержневых зазоров, совпадают.

4. В разряднике РВУ-43, на примере которого производился расчет, значения  $B_r$  в исследованных трех стадиях разряда составляют 3—6 мТл/кА, что, согласно [4], достаточно для стабильного существования дуги. Причем стабилизация дуги должна происходить преимущественно вблизи внешней границы межстержневого зазора ( $r > 3$  см) в случае трапецеидальных стержневых электродов, что согласуется с результатами экспериментов.

5. Радиальная составляющая индукции магнитного поля  $B_r$ , обусловленная протеканием тока в стержневых электродах, имеет наибольшие абсолютные значения и разные знаки у оснований канала дуги (на аноде и катоде), что является особенностью рассматриваемой электродной системы. Следствием последнего является то, что усилия, возникающие при взаимодействии  $B_r$  с током дуги, направлены у оснований канала дуги в противоположные стороны, а именно к торцам анодных и катодных стержней. Во второй стадии разряда разрядника РВУ-43 наибольшие абсолютные значения  $B_r$  равны 11—15 мТл/кА (см. табл. 2), что достаточно для распространения дуги вдоль межстержневого зазора. В последующих стадиях разряда, когда ток, приходящийся на один стержневой электрод, уменьшается и, следовательно, уменьшается  $B_r$ , дуга удерживается в межстержневых зазорах благодаря стабилизирующему действию составляющей индукции магнитного поля  $B_r$ , продольной по отношению к току дуги.

### Литература

1. Alferov D. F., Ivanov V. P., Sidorov V. A. High Current Vacuum Switch Devices for Power Energy Storages//IEEE Trans. on Magnetics. 1999. V. 35. № 1. P. 323—327.
2. Алферов Д. Ф., Иванов В. А., Сидоров В. А., Федоров В. В. Новое поколение сильноточных вакуумных управляемых разрядников//Прикладная физика. 2001. № 4. С. 41—49.

3. Алферов Д. Ф., Сидоров В. А. Развитие силовоточной вакуумной дуги в стержневой электродной системе//ТВТ. Т. 39. № 6. С. 865—872.

4. Watanabe K., Kaneko T., Yanabu S. Technological Progress of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters//IEEE Trans. on Plasma Science. 1997. V. 25. № 4. P. 609—616.

5. Lukatskaya I. A., Selikatoва S. M. Investigation of Arc Contact Systems of Vacuum Interrupters//Proc. of the VII-th Intern. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 1976. USSR. Novosibirsk. P. 434—437.

6. Лукацкая И. А., Данилов М. Е. Исследование магнитного поля в контактных системах вакуумных дугогасительных камер//Науч.-техн. конф. "Создание комплексов электротехн. оборудования высоковольтной, силовоточной и полупроводниковой техники". Тез. докл./ ГНЦ РФ ВЭИ. — М., 1994. С. 78—81.

7. Алферов Д. Ф., Лукацкая И. А., Селикатова С. М., Сидоров В. А. Исследование распределения магнитного поля в вакуумных управляемых разрядниках//Прикладная физика. 2001. № 4. С. 35—41.

8. Данилов М. Е., Филиппов А. А., Данилова Е. М., Шлырова Н. В. Оптимизация конструкции контактной системы КДВ на основе расчетов магнитного поля в дугогасящем промежутке//Науч.-техн. конф. "Создание комплексов электротехн. оборудования высоковольтной, силовоточной и полупроводниковой техники": Тез. докл./ГНЦ РФ ВЭИ. — М., 1994. С. 81—85.

9. Алферов Д. Ф., Лукацкая И. А., Селикатова С. М., Сидоров В. А. Распределение магнитного поля в стержневой электродной системе вакуумных управляемых разрядников//X конференция по физике газового разряда, ФГРХ. — Рязань, 2000: Тез. докл. С. 64—67.

## Distribution of the magnetic field in triggered vacuum switches with the rod electrode system at arc burning in the inter-rod gap

*D. Alferov, I. Lukatskaya, S. Selikatoва, V. Sidorov*  
Russian Electrotechnical Institute named after V. I. Lenin (VEI), Moscow, Russia

*The magnetic field in a triggered vacuum switch with the rod electrode system is calculated at the discharge evolution stage when the arc burns in the inter-rod gap. Distribution of the tangential  $B_t$ , radial  $B_r$ , and vertical  $B_z$  components of a magnetic field induction in the cylindrical system of coordinates is investigated. Successful operating of the triggered vacuum switch at the various stages of discharge evolution is shown, that provided with magnetic field components  $B_t$  and  $B_r$ , created by the current flow in the rod electrodes.*