

УДК 621.387.35

## Исследование распределения магнитного поля в вакуумных управляемых разрядниках

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

*Расчетным путем исследовано распределение магнитного поля в вакуумном управляемом разряднике с шестистержневой системой электродов, состоящей из чередующихся анодных и катодных стержней. Исследование выполнено для начальной стадии развития разряда, когда дуга горит вблизи узла поджига между основанием катода и одним (1-й случай) или всеми тремя (2-й случай) торцами анодов. Показано, что уже в начальной стадии развития разряда в обоих случаях в межстержневых зазорах создается магнитное поле, более благоприятное для существования дуги, чем вблизи узла поджига. Это способствует переходу дуги при токе более 6—8 кА в межстержневые зазоры, ее распространению вдоль стержневых электродов и погасанию вблизи узла поджига.*

Вакуумные управляемые разрядники в настоящее время находят широкое применение для коммутации мощных высоковольтных накопителей энергии. Применение в них стержневой системы электродов позволяет коммутировать токи до 200 кА при напряжении до 30 кВ с коммутационным ресурсом до  $10^4$  коммутаций [1]. Эти показатели значительно выше, чем удается получить в разрядниках с системами электродов других типов. Стержневая система электродов представляет собой чередующиеся стержни: аноды и катоды, расположенные по окружности и закрепленные на анодном и катодном держателях (рис. 1). Поджигающее устройство, как правило, размещено в держателе катодов (на рис. 1 не показано).

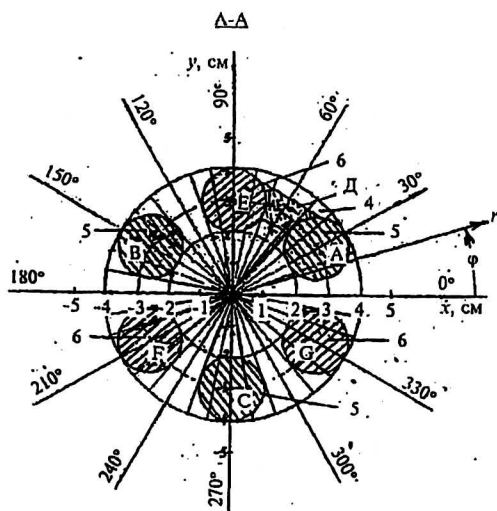
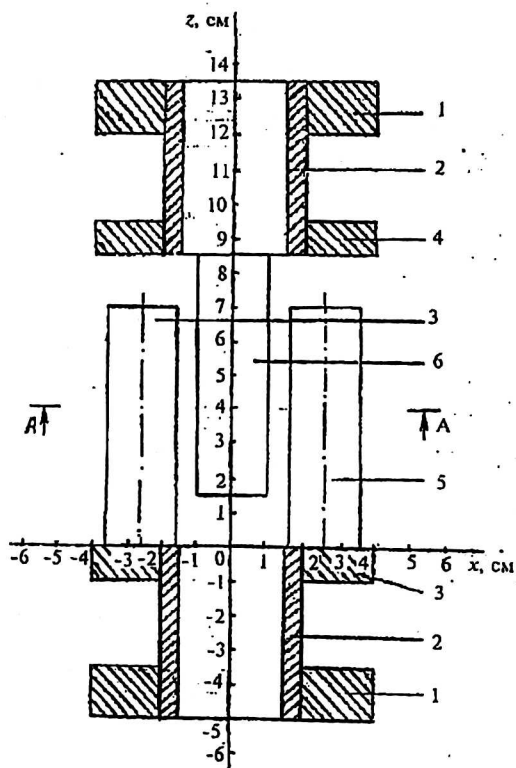


Рис. 1. Схема разрядника и система координат:

- 1 — фланцевые токовводы; 2 — цилиндрические токовводы; 3 — держатель анодов; 4 — держатель катодов; 5 — стержневые электроды электродов А, В, С; 6 — стержневые электроды катодов Е, F, G; D — дуга



После подачи импульса управления на узел поджига в разряднике возникает сильноточная вакуумная дуга. Скоростное фотографирование показало [2], что развитие дуги проходит через несколько стадий. На первой начальной стадии дуга горит вблизи узла поджига между держателем катодов и одним или несколькими торцами анодов, на второй стадии при токе более 6—8 кА дуга загорается в одном, нескольких или во всех межстержневых зазорах, распространяясь по всей их длине. В то же время, в промежутке между держателем катода и торцами анодов дуга погасает. Ход этого процесса определяется в основном током дуги. Переход дуги в межстержневые зазоры сопровождается ступенчатым уменьшением падения напряжения на дуге, причем на всех стадиях оно остается достаточно низким и, как правило, не превышает 200 В. Это обуславливает небольшую энергию, рассеиваемую на стержневых электродах, малую их эрозию и большой коммутационный ресурс разрядника.

Поведение дуги в разряднике зависит от ее взаимодействия с магнитным полем, возникающим при протекании тока в стержневой системе электродов. Известно, что при помещении сильноточной вакуумной дуги, возникающей в вакуумных дугогасительных камерах при размыкании контактов, в продольное магнитное поле, параллельное току дуги, она распространяется практически по всей поверхности контактов, падение напряжения в дуге уменьшается, а пороговый ток образования анодного пятна увеличивается. Это приводит к увеличению отключающей способности вакуумных дугогасительных камер. При этом достаточной является величина индукции магнитного поля не менее 1,5—2,5 мТл/кА [3]. Вышеописанное поведение дуги обусловлено уменьшением ухода заряженных частиц из плазмы дуги вследствие уменьшения поперечного коэффициента амбиполярной диффузии электронов и ионов в продольном магнитном поле [4]. Действует также известный эффект обратного движения катодных пятен вакуумной дуги, в результате которого область, занимаемая катодными пятнами, расширяется.

Стороннее поперечное магнитное поле 6—7 мТл/кА, перпендикулярное току дуги, оказывает заметное влияние на вакуумную дугу, вызывая ее движение по контактам в направлении, соответствующем правилу Ампера. При этих значениях индукции успешно работают вакуумные дугогасительные камеры с контактными системами, создающими радиальное, поперечное по отношению к току дуги, магнитное поле [5].

Опыт показывает, что в вакуумных дугогасительных камерах собственное магнитное поле тока вакуумной дуги вызывает ее сжатие (пинч-эффект), которое начинается в анодной области дуги при токе более 20 кА и диаметре катодной области около 2 см.

В настоящей работе было предпринято исследование распределения магнитного поля в вакуумном управляемом разряднике со стержневой системой электродов для выяснения его роли в развитии дуги. Исследование проводилось для первой начальной стадии развития дуги. Был выполнен расчет на персональном компьютере по программе [6], основанной на суммировании величин магнитной индукции, создаваемой элементарными постоянными токами и определяемой по закону Био и Савара.

### Объект и методика исследования

Исследовалась шестистержневая система электродов вакуумного управляемого разрядника типа РВУ-43. Положение элементов разрядника задавалось в цилиндрической системе координат, в которой  $r$  и  $\varphi$  — полярные радиус и угол проекции заданной точки на плоскость  $xu$ , а  $z$  — аппликата — расстоя-

ние точки от плоскости  $xу$ . Схематическое изображение стержневой системы электродов и системы координат приведено на рис. 1. Для упрощения расчетов принималось, что стержневые электроды имеют форму цилиндров. Вычислялись следующие составляющие индукции магнитного поля: тангенциальная  $B_t$ , перпендикулярная  $r$ , радиальная  $B_r$ , направленная вдоль  $r$ , и продольная  $B_z$ , параллельная оси  $z$ . Программой расчета предусмотрено расчленение тока в каждом проводнике на шесть линий с одинаковым током, распределенных равномерно по его сечению. При расчетах принято значение постоянного тока — 1 кА, направление тока — от анода к катоду, величины индукции магнитного поля выражались в мТл/кА.

Расчет проводился для первой стадии разряда, когда дуга горит вблизи узла поджига между держателем катода и одним или тремя торцами анодов. Анализировались составляющие индукции  $B_t$ ,  $B_r$  и  $B_z$  в полуплоскости  $zr$ , проходящей посередине зазоров между катодами и анодами. Исследование влияния составных частей разрядного контура на распределение магнитного поля показало, что оно определяется в основном токами в стержневых электродах и дуге. Небольшое влияние на распределение магнитного поля у оснований анодов и катодов оказывают токи в цилиндрических токовводах 2 и держателях 3 и 4 (см. рис. 1).

### Результаты исследования

Исследовались два случая первой стадии дуги, в каждом из которых катодом служил держатель 4 (см. рис. 1), а анодом в первом случае — торец анода  $A$ , во втором — торцы всех трех анодов  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Размеры и геометрия разрядника принимались такими, как показано на рис. 1. Для облегчения интерпретации результатов радиус стержней  $r_0$  принимался равным 1 мм. Дуга имитировалась цилиндром того же радиуса. Предполагалось, что в держателях 3 и 4 ток проходит по каналам с прямоугольным сечением шириной 2 см. Радиус  $R$  окружности, на которой располагались оси стержней, составлял 3 см.

На рис. 2 приведены зависимости составляющих индукции магнитного поля  $B_t$ ,  $B_r$  и  $B_z$  от полярного радиуса  $r$  и аппликаты  $z$  в полуплоскости  $zr$ , проходящей посередине зазора между анодом  $A$  и катодом  $E$  под полярным углом  $\varphi = 60^\circ$ . В первом случае начальной стадии развития разряда этот межстержневой зазор — один из ближайших к аноду  $A$ , по которому протекает ток, во втором случае — все межстержневые зазоры находятся в равных условиях. Зависимости  $B_t(r)$  и  $B_r(r)$  приведены для полярного радиуса  $r$  с аппликатой  $z = 4,5$  см, равноудаленного от торцов анодов и катодов. При  $z = 4,5$  см  $B_t$  и  $B_r$  значительно превышают  $B_z$ , поэтому последняя на графиках (см. рис. 2, *a*) не приведена.

Из рис. 2, *a* видно, что зависимость  $B_t(r)$  для первого случая проходит через 0 при значении  $r$ , несколько меньшем  $R = 3$  см, а наибольшее абсолютное значение  $B_t$  внутри стержневой системы электродов больше, чем снаружи. Такой ход зависимости обусловлен добавлением к  $B_r$ , создаваемой анодом  $A$ , составляющей  $B_t$ , вызванной протеканием токов в держателях 3 и 4 и цилиндрических токовводах 2 (см. рис. 1). Для второго случая составляющая  $B_t$  внутри стержневой системы электродов при  $r = 0-2$  см близка к нулю и начинает возрастать при  $r > 2$  см, и при  $r = 4$  см достигает максимального значения 4 мТл/кА. Такой ход зависимости  $B_t(r)$  обусловлен сложением этих составляющих, создаваемых токами в анодах  $A$ ,  $B$  и  $C$ . Во втором случае, когда ток протекает по трем анодам, зависимость  $B_t(r)$  в стержневой системе электродов аналогична таковой для полого цилиндра с радиусом  $R = 3$  см и тол-

щиной стенки 0,2 см. Так как ток распределен неравномерно по окружности цилиндра, а сосредоточен в области расположения трех анодов, то имеет место проникновение магнитного поля внутрь цилиндра вплоть до  $r = 2$  см. Наибольшее значение  $B_r$  при  $r = 4$  см во втором случае в 1,5 раза меньше, чем в первом. Это вызвано тем, что в первом случае по аноду  $A$  протекает весь ток разрядника, а во втором — лишь его треть.

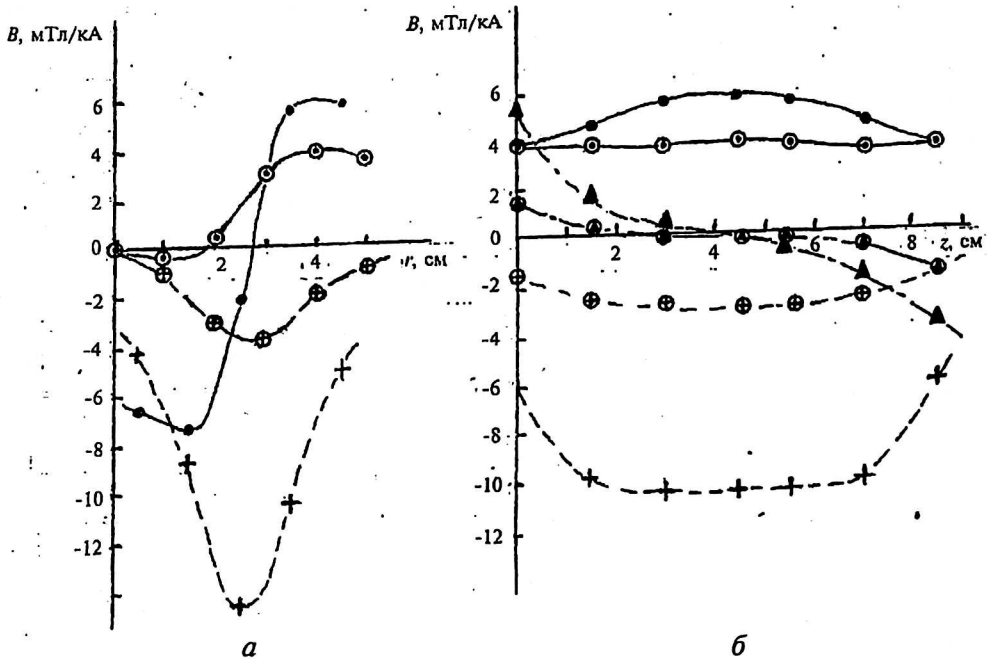


Рис. 2. Зависимости составляющих индукции магнитного поля  $B_r$ ,  $B_\theta$ ,  $B_z = f(r, z)$  для первой стадии развития дуги:

$\varphi = 60^\circ$ ; 1 —  $B_r$ ; 2 —  $B_\theta$ ; 3 —  $B_z$ ; значки без кружка соответствуют первому случаю, значки в кружке — второму случаю: а —  $z = 4,5$  см; б —  $r = 3,5$  см;  
 •  $\odot$  — 1;  $\oplus$  — 2;  $\blacktriangle$   $\triangleleft$  — 3

Зависимости  $B_r(r)$  для обоих случаев носят одинаковый характер и имеют наибольшее абсолютное значение  $B_r$  при  $r = 3$  см. Наибольшее абсолютное значение  $B_r$  в первом случае в 3,4 раза больше, чем во втором. Это является следствием того, что, во-первых, в анодах  $A$  в обоих случаях протекают разные токи, а во-вторых, во втором случае из составляющей  $B_r$ , обусловленной током в аноде  $A$ , вычитается  $B_r$ , вызванная током в аноде  $B$ .

На рис. 2, б представлены зависимости составляющих индукции магнитного поля от  $z$ . Видно, что при  $r = 3,5$  см  $B_r$  и  $B_\theta$  в области, где катодные и анодные стержни перекрываются ( $z = 1,5-1,7$  см), практически не зависят от  $z$  как для первого, так и для второго случая начальной стадии развития дуги.

За пределами области, где аноды и катоды перекрываются ( $1,5 < z < 7$ ) в первом случае  $B_r$  уменьшается, а во втором — увеличивается. Этот результат является следствием добавления к величине  $B_r$ , обусловленной током в стержневых электродах, составляющей, создаваемой током в цилиндрических тоководах 2 (см. рис. 1). Величина указанной составляющей индукции на краях стержневой системы электродов при  $z = 0$  и 8,5 см сравнима с таковой, возникающей во втором случае при протекании токов в стержневых электродах, а в ее середине при  $z = 4$  см — на полпорядка меньше.

Ход зависимостей  $B_z(z)$ , приведенных на рис. 2, б, обусловлен токами, протекающими в держателях 3 и 4. Наибольшие по абсолютной величине значения  $B_z$  в первом случае в 3,4 раза больше, чем во втором, что является следствием отличающихся в три раза токов в аноде А.

### Обсуждение результатов расчета

Рассмотрим влияние распределения магнитного поля на дугу на первой стадии и на переход дуги в межстержневые зазоры — на второй стадии. На первой стадии развития дуги, когда она горит между держателем 3 и торцом анода А (первый случай) или торцами всех анодов А, В, С ( $z = 7-8,5$  см), на дугу действуют составляющие магнитной индукции  $B_t$  и  $B_r$ , создаваемые током самой дуги и направленные по обе стороны от нее в разные стороны (на рис. 2, а это показано только для  $B_t$ ). Эти составляющие при взаимодействии с током дуги создают усилия, направленные внутрь к оси дуги и стремящиеся ее сжать.

Та часть составляющей  $B_t$ , которая внутри стержневой системы электродов на границе канала дуги при  $r = 2$  см вызвана протеканием тока в держателе 4, при взаимодействии с током дуги создает усилие, направленное по радиусу от центра стержневой системы электродов. Эта часть  $B_t$  на катоде дуги ( $z = 8,5$  см) для первого случая составляет 15 мТл/кА, для второго — 5 мТл/кА, на аноде ( $z = 7$  см), — соответственно, — 3 и 1 мТл/кА. Ток в держателе 4 создает также составляющую магнитной индукции  $B_z$ , параллельную току дуги и направленную по обе стороны от дуги в разные стороны. Как видно из рис. 2, б,  $B_z$  у катода ( $z = 8,5$  см) достигает 5,4 и 1,6 мТл/кА для первого и второго случая начальной стадии дуги, соответственно. Однако по мере удаления от катода  $B_z$  спадает у торцов анодов ( $z = 7$  см) и составляет лишь 1,7 и 0,4 мТл/кА для обоих случаев начальной стадии дуги. Составляющие  $B_t$  и  $B_z$ , обусловленные током в держателе 4, у катода достаточны по величине, чтобы оказать влияние на поведение дуги. Это влияние может выразиться в стабилизации катодной области дуги и ее смещении наружу, однако в анодной области, в которой величины указанных составляющих в несколько раз меньше, их влияние незначительно.

По сравнению с промежутками между держателем катодов и торцами анодов распределение магнитного поля в межстержневых зазорах более благоприятно для стабильного существования дуги с малым падением напряжения в ней.

Таким образом, стержневая система электродов уже в начальной стадии развития дуги обеспечивает условия для ее перехода в межстержневые зазоры. Действительно, как видно из рис. 2, вдоль межстержневого зазора ( $\varphi = 60^\circ$ ,  $r = 3,5$  см,  $z = 1,5-7$  см)  $B_t$  составляет в обоих случаях существования начальной стадии дуги 3,7—5,7 мТл/кА, а  $B_r = 2,8-10,5$  мТл/кА. При горении дуги в межстержневых зазорах составляющая магнитной индукции  $B_t$  параллельна току дуги и способствует уменьшению падения напряжения на дуге,  $B_r$  — перпендикулярна току дуги и при взаимодействии с ним вызывает усилие, направленные вдоль межстержневых зазоров, что способствует распространению дуги по всему межстержневому зазору. Как показывает сравнение  $B_t$  и  $B_r$  с данными [3, 5], их величины вполне достаточны для существования вакуумной дуги с малым падением напряжения на ней и для ее распространения вдоль стержневых электродов. Механизм перехода дуги в межстержневые зазоры можно представить следующим образом. В начальной стадии дуги плазменные потоки распространяются из области между держателем катодов

и торцами анодов в межстержневые зазоры, где составляющие индукции магнитного поля  $B_z$  и  $B_r$  направлены поперек плазменных потоков. Это вызывает их торможение и увеличение ионного тока на катодных стержнях, что способствует образованию на них катодных пятен, т. е. появлению дуги в межстержневых зазорах. А так как падение напряжения на дуге в этой области меньше (проводимость дуги выше), ток дуги перетекает в межстержневые зазоры и прекращается в промежутках между держателем катодов и торцами анодов.

### Заключение

Исследование распределения магнитного поля в межстержневых зазорах вакуумного управляемого разрядника с шестизазорной стержневой системой электродов для начальной стадии развития разряда, когда дуга горит вблизи узла поджига между держателем катодов и одним или всеми тремя торцами анодов, позволяет сделать следующие выводы.

1. Уже в начальной стадии развития разряда составляющие магнитной индукции  $B_z$  и  $B_r$  в межстержневых зазорах достигают величин 3,7—5,7 мТл/кА, соответственно, достаточных для существования дуги с малым падением напряжения на ней и способствующих распространению дуги вдоль стержневых электродов [3, 5].

2. В области существования дуги в начальной стадии составляющая магнитной индукции  $B_z$ , параллельная току дуги, лишь на катоде составляет 1,6—5,4 мТл/кА. По направлению к аноду она резко уменьшается, достигая на аноде величин 0,4—1,7 мТл/кА. При таких значениях составляющей магнитной индукции, параллельной току дуги, падение напряжения на дуге будет выше, чем если бы последняя горела в межстержневых зазорах [3].

3. Можно полагать, что распределение магнитного поля в начальной стадии развития разряда способствует возникновению дуги в межстержневых зазорах и перетеканию тока из промежутка вблизи узла поджига между держателем катодов и торцами анодов в межстержневые зазоры, где падение напряжения в дуге меньше.

### Литература

1. *Alferov D. F., Ivanov V. P., Sidorov V. A.* High Current Vacuum Switching Devices for Power Energy Storages // IEEE Trans. Magn. 1999. V. 35. № 1. P. 323—327.
2. *Alferov D. F., Sidorov V. A.* High-current Vacuum Arc Evolution in a Six-gap Rod Electrode System // Proc. XIX Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Xi-an-2000. China, 2000. P. 319—322.
3. *Watanabe K., Kaneko T., Yanabu S.* Technological Progress of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1997. V. 25. № 4. P. 609—616.
4. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. — М.: Наука, 1971.
5. Лукацкая И. А., Данилов М. Е. Исследование магнитного поля в контактных системах вакуумных дугогасительных камер // Науч.-техн. конф. "Создание комплексов электротехн. оборудования высоковольтной, силовой и полупроводниковой техники": Тез. докл./ГНЦ РФ ВЭИ. — М. 1994. С. 78—81.
6. Данилов М. Е., Филиппов А. А., Данилова Е. М., Шмырова Н. В. // Науч.-техн. конф. "Создание комплексов электротехн. оборудования высоковольтной, силовой и полупроводниковой техники": Тез. докл./ГНЦ РФ ВЭИ. — М., 1994. С. 81—85.

## Research of magnetic field distribution in triggered vacuum switches

*D. F. Alferov, I. A. Lukatskaya, S. M. Selikatova, V. A. Sidorov*  
The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

*Distribution of magnetic field in the triggered vacuum switch with 6-rod electrode system, with alternating anode and cathode rods, is investigated by calculation method. Research is fulfilled for the initial stage of discharge evolution when the arc burns near to the trigger unit, between the basis of the cathode rod and one (the first case) or all three end faces of anode rods (the second case). It is shown, that already at an initial stage of discharge evolution in both cases more favorable magnetic field for discharge evolution arises in the inter-rod gap in comparison with the field near the trigger unit. At a current more than 8 kA it promotes transition of the arc in the inter-rod gap and to distribution of arc along the rod electrodes and to extinguishing of arc near to the trigger unit.*