

УДК 537.52

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ДУГИ В ВАКУУМНОЙ ДУГОГАСИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ ПРИ МАЛЫХ РАССТОЯНИЯХ МЕЖДУ КОНТАКТАМИ

В.А. Лавринович, Туан Ань Хоанг

Томский политехнический университет  
E-mail: tuananh.tomsk@gmail.com

Изучены свойства вакуумной дуги, полученной при пробое межконтактного промежутка 0,25...1,00 мм. Показано, что свойства такой дуги идентичны свойствам вакуумной дуги, возникающей при отключении нагрузки вакуумным выключателем. Исследованы характеристики тока среза и остаточного тока вакуумной дуги.

### Ключевые слова:

Вакуумный выключатель, срез тока, ток среза, остаточный ток, перенапряжение.

### Key words:

Vacuum circuit breaker, current chopping, chopping current, residual current, overvoltage.

Вакуумные выключатели (ВВ) получили широкое распространение в электрических сетях, особенно на номинальное напряжение 6...35 кВ, вследствие ряда достоинств, отличающих их от других типов выключателей: автономность работы, высокая эксплуатационная надежность, высокая коммутационная износостойкость, простота обслуживания, низкие эксплуатационные затраты, малая энергия привода, высокое быстродействие и т. д. [1]. При отключении ВВ возникает электрическая дуга в межконтактном промежутке вакуумной дугогасительной камеры (ВДК). Свойства вакуумной дуги на разных этапах её горения описаны в работах [2, 3]. Однако процессы, происходящие в ВДК при небольших контактных расстояниях (от 0 до 1...2 мм), изучены недостаточно. Требуется более глубокие знания свойств дуги и восстанавливаемой электрической прочности межконтактного промежутка для учета в моделях вакуумных выключателей при расчете переходных процессов в электрических сетях. Данная задача актуальна, т. к. при этих режимах возможны такие явления, как повторные пробои между контактами ВДК, эскалация напряжения и виртуальные срезы тока.

### Экспериментальная установка

Исследования проводились на установке, содержащей конденсаторную батарею, катушки индуктивности и серийно выпускаемую ВДК типа КДВ-10–630/20 производителя ОАО «ЭЛКО»

(г. Минусинск). Вакуумная дуга возникала при пробое межконтактного промежутка ВДК в процессе повышения напряжения на конденсаторной батарее. Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Конденсаторная батарея состояла из 14 параллельно соединенных конденсаторов типа ИК–100, суммарная емкость составляла 4,5 мкФ, батарея заряжалась от автотрансформатора  $TV1$  и высоковольтного трансформатора  $TV2$  за время 80...90 с. Напряжение на выходе трансформатора  $TV2$  можно было регулировать в диапазоне 0...80 кВ. В качестве индуктивности  $L$  использовались катушки индуктивности без сердечников, суммарная индуктивность  $L$  изменялась от 0,82 до 7,64 мГн в зависимости от требуемого значения тока или частоты тока вакуумной дуги. Резистор  $R$  был включен для ограничения тока вакуумной дуги. Расстояние  $d$  межконтактного промежутка изменялось в пределах 0,25...1,00 мм. Для измерения величин напряжения и тока применяли резистивный делитель напряжения ( $R_v$ ,  $R_n$ ) и шунт  $R_{ш}$ . Для регистрации напряжения и тока использовались 2 осциллографа типа *Tektronix TDS 2012 B* (100 МГц).

### Определение электрической прочности межконтактного промежутка ВДК

Качество вакуума отпаянных ВДК было определено по их электрической прочности, т. е. по зависимости пробивного напряжения от межконтакт-

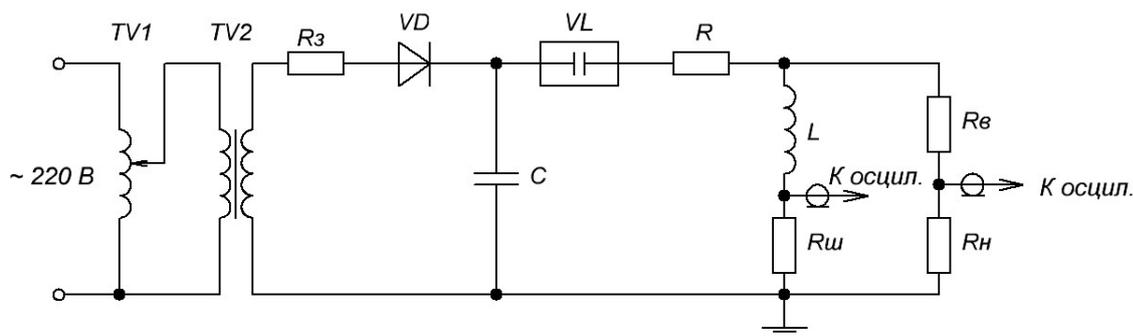


Рис. 1. Электрическая схема экспериментальной установки

ного расстояния. ВДК подключалась к конденсаторной батарее, рис. 1. Для каждого расстояния проведено 10 экспериментов по пробою межконтактного промежутка постоянным напряжением без кондиционирования контактов. Полученные экспериментальные данные приведены на рис. 2.

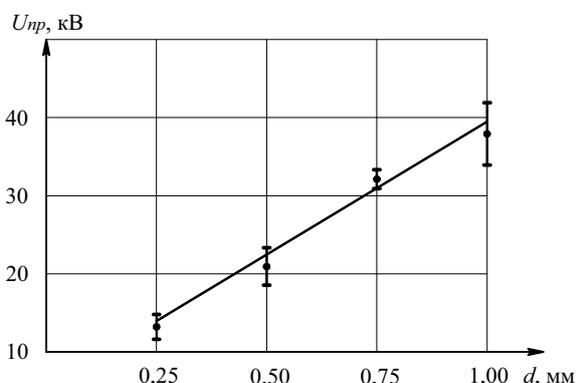


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения межконтактного промежутка ВДК от расстояния  $d$  между контактами

Приведенная зависимость показывает, что значения пробивного напряжения соответствуют давлению в ВДК не менее  $10^{-3}$  Па [2], что обеспечивает нормальную работу ВВ. Наблюдается линейный рост пробивного напряжения от расстояния между контактами. Разброс пробивного напряжения составляет около 10 %. Это объясняется тем, что автоэлектронная эмиссия начинается с разных участков активных областей на поверхности контактов из-за их шероховатости. В свою очередь, это приводит к пробою при различных напряжениях.

#### Ток среза и остаточный ток вакуумной дуги

Срез тока – явление, характерное для вакуумных дуг при коммутации токов промышленной частоты, представляет собой резкое падение тока от некоторого значения до нуля. Из-за малого времени и высокой скорости спада тока срез тока может приводить к значительному уровню перенапряжения, особенно на индуктивной нагрузке. В ВДК первых поколений контакты изготавливались из тугоплавких материалов, таких как вольфрам и молибден, при этом ток среза составлял 10...30 А, что приводило к более чем 10-и кратным перенапряжениям. Перенапряжения, возникающие при коммутации ВВ, являлись главной причиной ограничения их распространения в электрической сети. В настоящее время, благодаря применению CuCr в качестве материала контактов ВДК, значение тока среза существенно снижено. Однако, перенапряжения всё-таки существуют, являясь причиной старения изоляции энергетического оборудования. В данной работе значения тока среза определялись при использовании ВДК с контактами из CuCr при протекании тока дуги двух форм – аperiodической и колебательной.

При изменении значения сопротивления резистора  $R$  в экспериментальной установке (рис. 1) от 7,0 до 0,3 кОм, максимальный разрядный ток дуги растет от 5,7 до 143 А и носит аperiodический характер. Типичная осциллограмма тока при наличии среза тока приведена на рис. 3. На всех осциллограммах верхняя кривая соответствует напряжению на резисторе или индуктивности, нижняя кривая – ток среза  $I_c$  от максимального тока дуги приведена на рис. 4.

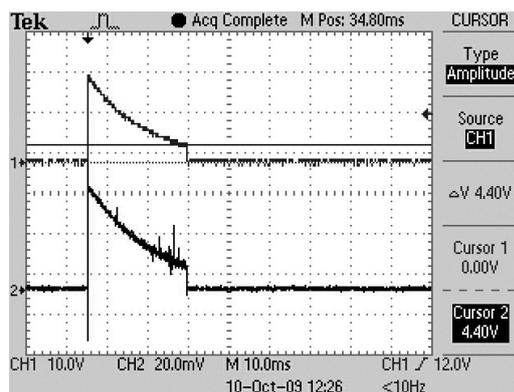


Рис. 3. Типичная осциллограмма тока среза при аperiodическом токе вакуумной дуги

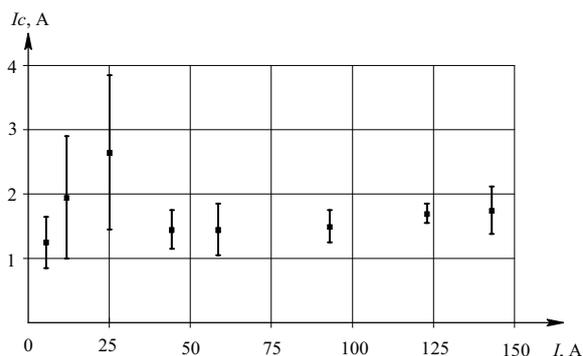


Рис. 4. Зависимость тока среза от максимального тока дуги

Экспериментальные результаты показывают, что с ростом тока дуги среднее значение тока среза увеличивается, достигая максимального значения, затем уменьшается до постоянного значения. Аналогичная зависимость наблюдалась в эксперименте [1] и при моделировании [4]. Отличие заключается в том, что значения тока среза, полученные в [1], гораздо больше, чем в наших экспериментах, т. к. в [1] были использованы контакты из вольфрама. В [4] срез тока был промоделирован на основе времени горения дуги постоянного тока.

Полученная зависимость тока среза от максимального тока дуги объясняется следующим образом. При малом токе вакуумная дуга неустойчива, вероятность погасания дуги большая, время горения дуги мало, срез тока происходит через небольшой промежуток времени после его максимума, поэтому ток среза относительно велик (ток среза составляет 22...11 % от максимального тока дуги).

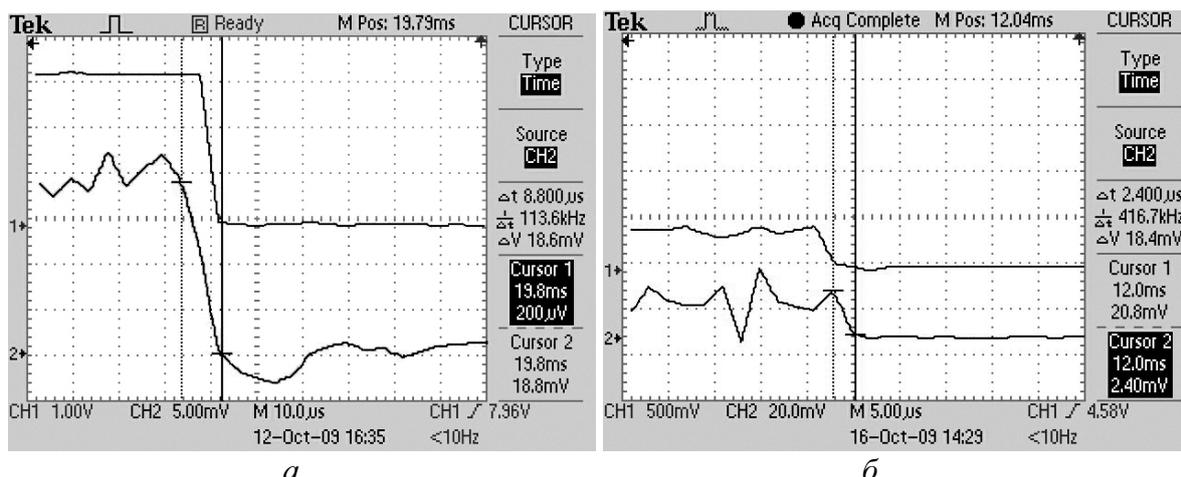


Рис. 5. Определение времени среза тока

При большом токе поверхность контактов разогревается, давление пара материала контактов высокое, вакуумная дуга более устойчива, время горения дуги растет с ростом тока, срез тока становится затрудненным, ток среза уменьшается.

При дальнейшем увеличении тока температура контактов за счет теплоотвода стабилизируется, ток среза не зависит от тока дуги (ток среза составляет всего 3,3...1,2 % от максимального тока дуги). Кроме того, ток среза является статистической величиной. Доказательством этого служит большой разброс значений тока среза, особенно при малых токах дуги. Определение времени спада тока при срезе по осциллограммам тока показывает, что при малых токах дуги это время составляет примерно 9 мкс (рис. 5, а); а при токе дуги  $I=25...93$  А, это время составляет примерно 2...3 мкс (рис. 5, б).

Перенапряжения, возникающие при срезе тока, определяются не только значением тока среза, но и скоростью подхода тока к нулю  $di/dt$ . Скорость подхода тока к нулю  $di/dt$  определялась по закону Ленца:  $di/dt=|U/L|$ , где  $U$  – напряжение, возникающее на индуктивной нагрузке  $L$  при срезе тока. Экспериментальные данные скорости подхода тока к нулю  $di/dt$  в зависимости от индуктивности  $L$  и тока среза приведены в таблице.

Таблица. Определение скорости подхода тока к нулю  $di/dt$  при срезе тока

|                 |      |      |      |      |             |
|-----------------|------|------|------|------|-------------|
| $L$ , мГн       | 0,82 | 1,64 | 3,28 | 6,28 | Примечания  |
| $I_c$ , А       | 2,8  | 2,8  | 3,1  | 3,2  |             |
| $di/dt$ , А/мкс | 4,3  | 4,5  | 1,7  | 1,4  | $d=0,25$ мм |
| $I_c$ , А       | 2,9  | 2,8  | 2,7  | –    | $d=0,50$ мм |
| $di/dt$ , А/мкс | 6,5  | 3,7  | 1,5  | –    |             |

Полученные результаты показывают, что с ростом индуктивности  $L$  от 0,82 до 6,28 мГн скорость подхода тока к нулю  $di/dt$  при срезе тока снижается от 4,3...6,5 до 1,4...1,5 А/мкс, причем ток среза остается постоянным.

При отсутствии резистора  $R$  (рис. 1), ток через ВДК имеет колебательный характер. В этом случае при отключении тока сначала наблюдается резкое изменение тока вакуумной дуги (рис. 6), затем он восстанавливается до первоначального значения. Потом этот процесс повторяется. В дальнейшем восстановление начального уровня тока становится затрудненным. На ток основной частоты накладывается высокочастотный ток, характерный при горении дуги в вакууме. Затем ток вакуумной дуги доходит до нуля, дуга гаснет. Полное время отключения тока составляет примерно 20 мкс, а током среза считается ток, при котором происходит первое резкое изменение тока вакуумной дуги.

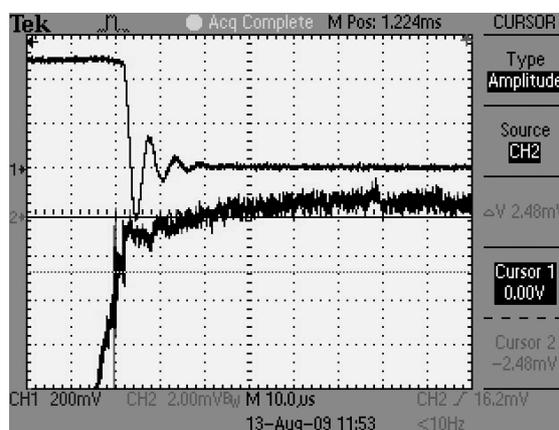


Рис. 6. Типичная осциллограмма тока среза при колебательном токе вакуумной дуги

Было определено значение тока среза при индуктивности  $L=7,64$  мГн и расстоянии между контактами ВДК  $d=0,25$  мм. Получено, что значение тока среза произвольно изменяется от 0,9 до 6,0 А, среднее значение тока среза при 50-и экспериментах составляет 3,0 А. Гистограмма тока среза при этих условиях приведена на рис. 7.

При подъеме тока после его прохождения через нулевое значение, по-видимому, также возможен срез тока. В этом случае наблюдается резкое изме-

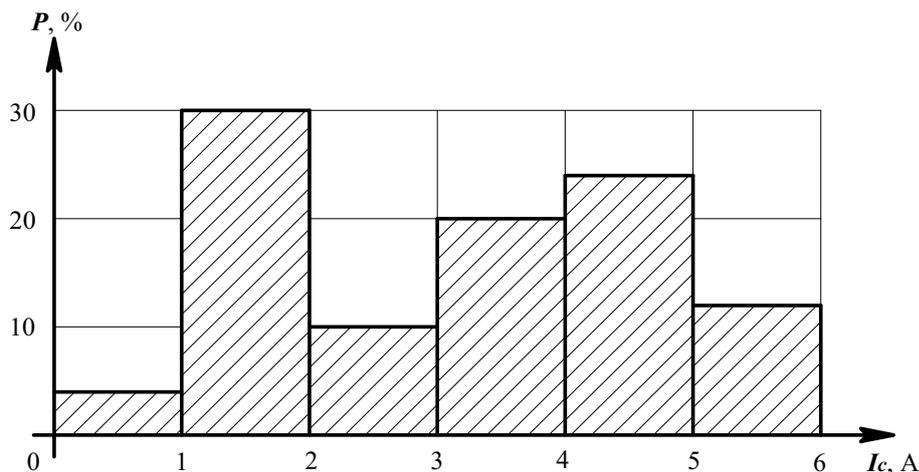


Рис. 7. Гистограмма тока среза при токе вакуумной дуги 50 А (материал контактов ВДК – CuCr);  $P$  – вероятность тока среза

нение тока дуги (обрыв тока), но ток в контуре полностью восстанавливается до значения, при котором произошел срез, затем ток увеличивается до некоторого максимального значения, которое значительно меньше амплитуды тока. Потом ток постепенно падает до нуля и дуга гаснет (рис. 8). Ток, появляющийся при этом, можно называть остаточным током. Ток последнего полупериода до появления остаточного тока называется отключаемым током. Отключаемый ток показывает, какой ток может отключить ВДК при данном межконтактном расстоянии.

Между отключаемым и остаточным токами существует взаимосвязь, которая приведена на рис. 9, при изменении расстояния  $d$  межконтактного промежутка от 0,25 до 1,00 мм. Экспериментальные данные показывают, что время существования остаточного тока после нуля тока не зависит от расстояния  $d$  между контактами и составляет 330...375 мкс. Это означает, что чем больше рас-

стояние между контактами и ток вакуумной дуги, тем больше скорость движения носителей заряда.

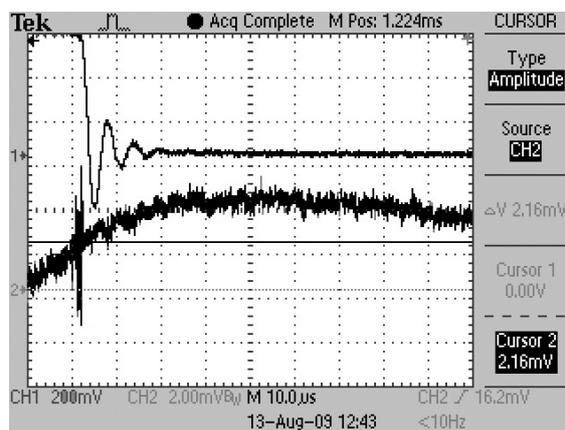


Рис. 8. Типичная осциллограмма остаточного тока

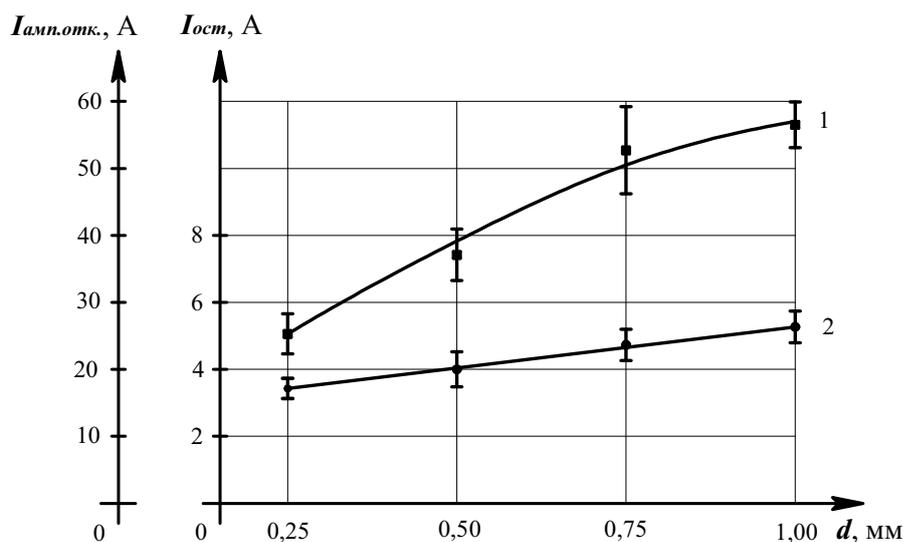


Рис. 9. Зависимости амплитуды отключаемого тока  $I_{амп.отк.}$  (1) и остаточного тока  $I_{ост.}$  (2) от расстояния между контактами

С ростом расстояния  $d$  амплитуда отключаемого тока  $I_{амп.омк.}$  и остаточного тока  $I_{ост.}$  увеличиваются (рис. 9). Это объясняется тем, что рост тока, обусловленный увеличением расстояний между контактами, приводит к повышению начального давления пара материала контактов в ВДК. Согласно [5], снижение концентрации носителей заряда в межконтактном промежутке при высоком давлении пара материала контактов незначительно, поэтому конечное и остаточное давления пара материала контактов тоже растут, что соответствует росту амплитуды отключаемого и остаточного токов.

Полученные в данной работе результаты могут быть использованы для моделирования переходных процессов в электрической сети при отключении небольшого (до 60 А) индуктивного тока вакуумным выключателем.

#### Выводы

1. Изучены свойства вакуумной дуги, полученной при пробое межконтактного промежутка 0,25...1,00 мм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воздвиженский В.А., Гончаров А.Ф., Козлов В.Б. и др. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
2. Лафферти Дж. Вакуумные дуги: пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 432 с.
3. Slade P.G. The vacuum interrupter: theory, design and application. – CRC Press, 2008. – 510 p.
4. Chaly A.M., Chalaya A.T., et al. The features of 0,4 kV motor interruption by a vacuum contactor with different contact materials //

2. Выявлено, что значение тока среза зависит от максимального тока дуги. При отключении токов преимущественно индуктивного характера наблюдаются равновероятные значения тока среза от 1 до 6 А, в то время как при отключении токов преимущественно активного характера ток среза не превышает 2 А. В любом случае ток среза является случайной величиной.
3. Срез тока апериодической формы происходит за несколько микросекунд. Скорость подхода тока к нулю при срезе тока составляет 6,5...1,4 А/мкс при увеличении индуктивности цепи от 0,82 до 6,28 мГн. Корреляции между током среза и значением индуктивности электрической цепи не наблюдается.
4. Если резкое изменение тока вакуумной дуги происходит при подъеме тока после его прохождения через нуль, то наблюдается остаточный ток. Амплитуда остаточного тока растет от 3,4 до 5,3 А при увеличении межконтактного расстояния – от 0,25 до 1,00 мм. Поскольку скорость изменения тока при этом невелика, перенапряжения не наблюдаются на индуктивности 0,82...7,64 мГн.

Proc. of the 18<sup>th</sup> Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Eindhoven, 1998. – P. 435–438.

5. Huber E.F.-J., Weltmann K.D., Froehlich K. Influence of interrupted current amplitude on the post-arc current and gap recovery after current zero // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1999. – V. 27. – № 4. – P. 930–937.

Поступила 08.06.2010 г.