

## **Обоснование принципа выбора состава материалов контактов вакуумной дугогасительной камеры синхронного вакуумного контактора**

А. В. Верхола

Донбасский государственный технический университет, Алчевск, Украина

E-mail: verkhola@mail.ru

*Показано, что применение синхронного отключения в низковольтных вакуумных контакторах существенно изменяет условия работы контактов. Делается вывод о необходимости учёта вносимых изменений при выборе состава материала контактов вакуумной дугогасительной камеры синхронного вакуумного контактора.*

**Ключевые слова:** *низковольтный вакуумный контактор, синхронное отключение, состав материала контактов.*

### **Введение**

Преимущества низковольтных вакуумных контакторов (НВК) по сравнению с контакторами с гашением дуги в воздухе (высокая коммутационная износостойкость, малый объём, простота обслуживания, отсутствие выброса продуктов горения дуги) по достоинству оценили многие зарубежные фирмы и приступили к динамичному наращиванию спектра выпускаемых вакуумных контакторов. Отечественные НВК пока недостаточно представлены на рынке низковольтной аппаратуры. Одной из проблем, сдерживающих более широкое внедрение НВК, является их относительно высокая стоимость. Проведенные исследования [1] показали, что затраты на один цикл коммутации у вакуумных контакторов КМ1937 и КТ12Р37 более чем в два раза превосходят затраты у аналогичных контакторов с гашением дуги в воздухе (контактор КТП6043). Известно, что 60—70% стоимости вакуумного контактора составляет стоимость вакуумных дугогасительных камер (ВДК). В этой связи представляется актуальным проведение исследований, направленных на удешевление ВДК путём упрощения конструкции и уменьшения количества дорогостоящих материалов, используемых в контактах.

### **Анализ исследований и публикаций**

Традиционно в основе принципа выбора состава материала контактов низковольтной вакуумной дугогасительной камеры лежит стремление к удовлетворению следующих требований [2, 3]: низкое содержание газа в материале контактов; малое переходное сопротивление контактов; хорошая механическая стойкость к повторяющимся ударам, возникающим при замыкании контактов; малая способность к свариванию контактных поверхностей; высокая включающая и отключающая способности; обеспечение хороших диэлектрических свойств межконтактного промежутка в разомкнутом состоянии; технологичность изготовления контактов; высокая коммутационная износостойкость контактов; малый ток среза.

Низкое содержание газа в контактных материалах необходимо для поддержания внутри дугогасительной камеры высокого вакуума. В процессе производства ВДК выполняется её дегазация откачкой из корпуса в течение нескольких часов при температуре около 500 °С. Но даже это не обеспечивает освобождение контактного материала от газа, связанного с металлом в виде химических соединений. При горении дуги такой газ может высвобождаться и снижать качество вакуума. По этой причине в ВДК приходится использовать более дорогие материалы, не содержащие газов в виде химических соединений, например бескислородную медь [2].

Для обеспечения малой способности к свариванию контактных поверхностей необходимо ввести в состав композиционного контактного материала хрупкие компоненты, снижающие прочность сварного соединения. Например, в медно-хромовых композиционных контактах увеличением размеров зёрен хрома можно добиться снижения свариваемости контактов. Однако чрезмерное увеличение зёрен ведёт к снижению электрической прочности контактного промежутка, а следовательно, необходим оптимальный подбор количества и размеров компонентов.

Малое переходное сопротивление, необходимое для уменьшения тепловыделения при протекании токов нагрузки, должно обеспечиваться высокой электрической проводимостью

контактного материала. Компонент контактного материала с высокой электрической проводимостью не должен образовывать с другими компонентами растворов и химических соединений. В контактных материалах для вакуумных контакторов в качестве такого компонента в настоящее время часто используется серебро, например в композиции  $Ag-W-C$  [2].

Хорошие диэлектрические свойства межконтактного промежутка в разомкнутом состоянии могут быть обеспечены, если:

поверхность контакта гладкая, без микроострий и существенных шероховатостей;

на поверхности контактов отсутствуют точки перегрева, создающие термоэлектронную эмиссию;

материал не склонен к образованию легко отделяемых частиц.

Для обеспечения высокой включающей и отключающей способности материал должен выделять малое количество паров при горении дуги и характеризоваться низким разбрызгиванием в этих условиях. В то же время для обеспечения малого тока среза материал контактов должен способствовать поддержанию устойчивых катодных пятен до момента достижения уменьшающимся током значения, при котором вследствие явления среза тока не возникает опасных перенапряжений. Поиск и реализация компромиссного состава контактного материала в этом случае также приводят к удорожанию ВДК в целом.

До настоящего времени не существует однокомпонентный материал, который удовлетворял бы всем перечисленным требованиям. Поэтому используемые сейчас контактные материалы чаще всего являются либо трёхкомпонентными сплавами, либо композиционными материалами, полученными спеканием и пропиткой.

Один из вариантов решения проблемы повышения экономичности ВДК без ухудшения работоспособности показан на рис. 1 [4]. В таких контактах легкоплавкий компонент 1 располагается в выемках тугоплавкой контактной накладке 2. При размыкании контактов возникшая дуга опорными пятнами первоначально располагается на тугоплавком компоненте 2. Далее, под действием электромагнитных сил дуга смещается к границе раздела тугоплавкого и легкоплавкого компонентов. За счёт интенсивного испарения легкоплавкого компонента поддерживается горение дуги до таких значений тока среза, которые не вызывают возникновения опасных перенапряжений. Тугоплавкий компонент предотвращает воздействие дуги на медное основание контакта 3. Подобные контакты использованы в низковольтных вакуумных дугогасительных камерах серии КДВ-12.

У молибдена, используемого в качестве тугоплавкого компонента, электро- и теплопроводность почти в 3 раза меньше, чем у меди. Это накладывает ограничения на величину тока, который можно пропускать по контактам в продолжительном режиме работы. Конструкция контактов [5], показанная на рис. 2, позволяет уменьшить тепловое и электрическое сопротивление молибденовой накладки за счёт уменьшения её толщины. Кроме того, уменьшается масса молибдена в ВДК, который является более дорогим компонентом, чем медь.

Тем не менее, предложенные конструктивные решения все же являются недостаточно экономичными, поскольку входящие в многокомпонентные составы материалы в большинстве своем являются дорогостоящими, а технология их получения предполагает использование дорогостоящего оборудования.

Повышению показателя экономичности может способствовать увеличение долговечности работы контактов. При неизменном конструктивном решении этот фактор зависит, главным образом, от условий воздействия дугового разряда на контакты с учетом ограничений, налагаемых наличием глубокого вакуума.

Существует возможность уменьшить воздействие электрической дуги отключения на контакты ВДК. Для этого может быть использовано синхронное отключение. При синхронном отключении уменьшается количество энергии, выделяющейся в дуге, что снижает дуговую эрозию контактов и выделение газов из контактных материалов вследствие меньшего их нагрева дугой и повышает отключающую способность. Кроме того, установлено, что синхронное отключение способствует снижению тока среза [6, 7]. Проведенные исследования показывают, что при синхронном отключении контакты ВДК работают в режиме, во многом отличающемся от обычного. Это даёт основания для пересмотра некоторых требований, предъявляемых к составу материала контактов ВДК низковольтного синхронного вакуумного контактора.

Цель работы — обоснование выбора состава материала контактов низковольтной вакуумной дугогасительной камеры, учитывающего особенности работы контактов при синхронном отключении.

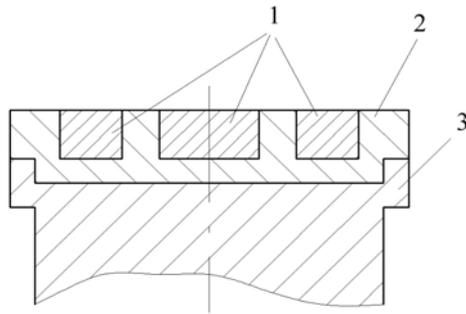


Рис. 1. Контакт низковольтной вакуумной дугогасительной камеры: 1 — легкоплавкий компонент (55—99% (мас.) Sb, остальное — Bi); 2 — тугоплавкий компонент (Mo или W); 3 — основание контакта (Cu).

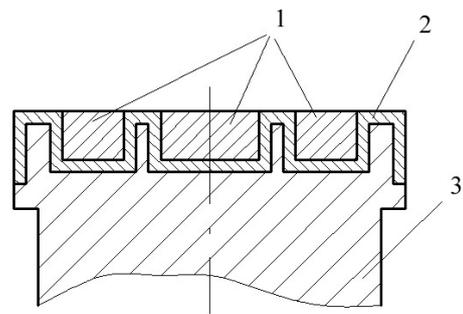


Рис. 2. Контакт с барьерным слоем: 1 — легкоплавкий компонент; 2 — тугоплавкий компонент; 3 — основание контакта.

### Предмет и методы исследования

Предметом исследования является обоснованность внесения изменений в состав материала контактов вакуумной дугогасительной камеры, работающих в режиме синхронного отключения. Метод исследования — математическое моделирование с последующей экспериментальной проверкой.

Для оценки коммутационного износа несинхронных низковольтных вакуумных контакторов КТ12Р37 используется зависимость, полученная при экспериментальных исследованиях контакторов с вакуумными дугогасительными камерами типа КДВ-12-37 [8]:

$$L_H = 1,64 \cdot 10^{-9} N \cdot I_d, \quad (1)$$

где  $L_H$  — линейный износ контактов ВДК при несинхронном отключении, мм;  $N$  — количество коммутаций, циклы ВО;  $I_d$  — действующее значение коммутируемого тока, А.

Формула (1) не позволяет определять износ контактов при синхронном отключении. Учёт времени горения дуги при синхронном отключении может быть выполнен при расчёте износа контактов по формуле

$$L_c = 5,15 \cdot 10^{-10} N \int_{t_p}^{t_k} I_d \cdot \sin(\omega t) \cdot dt, \quad (2)$$

где  $L_c$  — линейный износ контактов вакуумной дугогасительной камеры при синхронном отключении, мм;  $t_p$  — момент размыкания контактов относительно начала полупериода отключаемого тока, с;  $t_k$  — момент погасания дуги (конец полупериода), с.

Длительность горения дуги  $T$  при синхронном отключении принимается равной времени упреждения размыкания контактов перед естественным нулём отключаемого тока. При известной длительности периода отключаемого тока связь между моментом размыкания контактов  $t_p$  и временем упреждения  $t_y$  устанавливается зависимостью

$$t_y = T/2 - t_p. \quad (3)$$

Под воздействием большого количества возмущающих факторов при каждом отключении происходит некоторое отклонение времени упреждения от первоначально заданной величины. Как было установлено, время упреждения в таких условиях подчинено нормальному закону распределения с двумя точками наложения [9]. Методика учёта разброса времени упреждения при расчёте износа контактов изложена в работе [10]. Результат расчётов, выполненных по предложенным соотношениям, приведен на рис. 3.

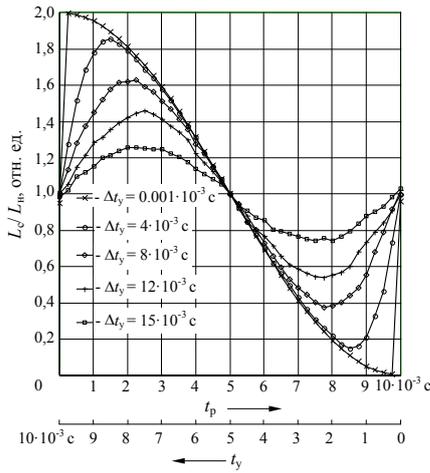


Рис. 3. Зависимость отношения износа при синхронном отключении  $L_C$  к износу при несинхронном отключении  $L_H$  от времени размыкания контактов  $t_p$ , времени упреждения размыкания контактов  $t_y$ , разброса времени размыкания контактов  $\Delta t_p$  и разброса времени упреждения размыкания контактов  $\Delta t_y = \Delta t_p$ .

В соответствии с исследованиями [11] максимальное значение перенапряжения при срезе тока

$$U_M = U_0 + i_c Z, \quad (4)$$

где  $Z$  — волновое сопротивление отключаемого контура, Ом;  $i_c$  — ток среза, А;  $U_0$  — мгновенное значение рабочего напряжения в момент среза тока, В.

Волновое сопротивление  $Z$  определяется по методике, изложенной в работе [12], с использованием формулы

$$Z = 1652 - 0,73P, \quad (5)$$

где  $P$  — мощность отключаемого электродвигателя, кВт.

Мгновенное значение рабочего напряжения в момент среза тока

$$U_0 = U_A \cdot \cos\left(\arcsin \frac{i_c}{I_A}\right), \quad (6)$$

где  $U_A$  — амплитуда рабочего напряжения отключаемой цепи, В;  $I_A$  — амплитуда отключаемого тока, А.

С учётом (6) максимальное значение перенапряжения

$$U_M = U_A \sqrt{1 - \left(\frac{i_c}{I_A}\right)^2} + i_c Z. \quad (7)$$

При синхронном отключении момент размыкания контактов  $t_p$  определяется законом распределения времени упреждения  $t_y$ . Различным моментам размыкания контактов соответствуют определенные величины тока среза, подчиняющиеся зависимости  $i_c = p(t_p)$  [6].

В соответствии с законом распределения  $t_y$  количество отключений  $n_i$ , приходящееся на интервал времени упреждения  $(\alpha, \beta)$ , при общем числе произведенных отключений  $N$  составляет

$$n_i = NP(\alpha < t_y \leq \beta), \quad (8)$$

где  $P(\alpha < t_y \leq \beta)$  — вероятность попадания времени упреждения  $t_y$  в интервал  $(\alpha, \beta)$ , которая определяется по формуле

$$P(\alpha < t_y \leq \beta) = \bar{\Phi}\left(\frac{\beta - m_y}{\sigma_y}\right) - \bar{\Phi}\left(\frac{\alpha - m_y}{\sigma_y}\right), \quad (9)$$

где  $\alpha, \beta$  — левая и правая границы интервала;  $\bar{\Phi}(x)$  — функция Лапласа:

$$\bar{\Phi}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot dx. \quad (10)$$

При расчете математического ожидания амплитуды коммутационных перенапряжений  $M[U_m]_C$ , соответствующей синхронному отключению, используя зависимость  $i_c = p(t_p)$  и учитывая (3), для времени упреждения  $t_{yi}$  определяется величина тока среза  $i_{ci}$ , соответствующего середине

интервала ( $\alpha, \beta$ ). По значению  $i_{Ci}$  с использованием (7) вычисляется амплитуда перенапряжений  $U_{mi}$ , соответствующая размыканию контактов в момент времени  $t_{pi}$ . Затем рассчитывается математическое ожидание амплитуды перенапряжений  $M[U_m]_c$  при синхронном отключении:

$$M[U_m]_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K U_{mi} \cdot n_i, \quad (11)$$

где  $N$  — общее число отключений;  $K$  — количество интервалов, на которые разбивается область разброса значений времени упреждения  $\Delta t_y$  при определении  $n_i$ .

С использованием предложенных соотношений был выполнен расчёт, результаты которого представлены на рис. 4.

### Результаты исследований и их обсуждение

Исследования, проведенные с помощью математических моделей с последующей экспериментальной проверкой [7], показали, что применение синхронного отключения существенно изменяет условия работы контактов низковольтной вакуумной дугогасительной камеры. С помощью зависимостей, изображённых на рис. 3, по отношению  $L_C / L_H$  для конструкции контактов, показанной на рис. 1, можно определить, какая часть тугоплавкого компонента контакта по высоте будет изношена при синхронном отключении с заданными  $t_y$  и  $\Delta t_y$ . Обратное отношение  $L_H / L_C$  позволяет установить, во сколько раз может быть уменьшена высота тугоплавкой накладки при использовании синхронного отключения. Соответственно, для конструкции контактов, изображённой на рис. 2, отношение  $L_H / L_C$  показывает, во сколько раз может быть уменьшена толщина барьерного слоя при использовании синхронного отключения. При этом для обеих конструкций контактов с уменьшением высоты тугоплавкой накладки должен быть уменьшен и объём легкоплавкого компонента, размещённого в выемках на торцах контактов.

Анализ результатов, приведенных на рис. 4, показывает, что наименьшая величина перенапряжений приходится на моменты размыкания контактов, группирующиеся вблизи точек перехода отключаемого тока через нулевое значение. Эффект снижения перенапряжений, полученный в результате применения синхронного отключения, можно использовать для уменьшения соотношения площади поверхности тугоплавкого и легкоплавкого компонентов контакта. В перспективе, при разработке конструкции СВК, обеспечивающей достаточно малый разброс времени упреждения, легкоплавкая составляющая может быть полностью исключена, поскольку уменьшение коммутационных перенапряжений будет достигнуто за счёт синхронного отключения.

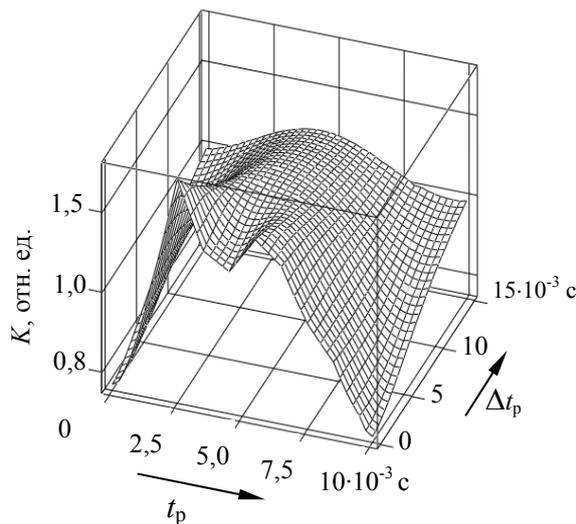


Рис. 4. Зависимость отношения  $K$  математического ожидания амплитуды перенапряжений при синхронном отключении  $M[U_m]_c$  к математическому ожиданию амплитуды перенапряжений при несинхронном отключении  $M[U_m]_H$  от времени размыкания контактов  $t_p$  и разброса времени размыкания контактов  $\Delta t_p$ .

### Выводы

Проведенные исследования показали, что в результате применения синхронного отключения условия работы контактов ВДК существенно изменились. В связи с этим представляется целесообразным изменить требования к составу материала контактов вакуумной дугогасительной камеры синхронного вакуумного контактора. При выборе количества тугоплавкого компонента необходимо учитывать уменьшающийся за счёт синхронного отключения износ контактов. В

контактах с конструктивным разделением тугоплавкого и легкоплавкого компонентов это позволит уменьшить массу обоих компонентов и, следовательно, уменьшить стоимость ВДК.

Ограничение коммутационных перенапряжений за счёт синхронного отключения позволяет изменить соотношение тугоплавкого и легкоплавкого компонентов вплоть до полного исключения последнего. Это должно привести к уменьшению стоимости ВДК за счёт снижения затрат на материал легкоплавкого компонента и упрощения конструкции контактов.

Для выяснения возможности изменения состава материала композиционных контактов или контактов из сплавов при использовании их в контакторах с синхронным отключением необходимо проведение дополнительных исследований.

1. *Верхола А. В.* Оценка технических и экономических характеристик синхронного вакуумного контактора // Вісник Криворізького техн. ун-ту. — 2010. — Вип. 25. — С. 41—46.
2. *Теолейр С.* Отключение в вакууме // Техническая коллекция Schneider Electric. — 2008. — № 14. — С. 21—24.
3. *Контактные системы вакуумных дугогасительных камер.* [Электронный ресурс]. — Режим доступа к ресурсу: <http://leg.co.ua/info/vyklyuchateli/kontaktnye-sistemy-vakuumnyh-dugogasitelnyh-kamer.html>.
4. *Пат. 1142200 Великобритании.* Improvements relating to vacuum switch contacts / Grindell Duncan Holmes.; Ass Elect Ind. — Publ. 05.02.69.
5. *А. с. 421054 СССР.* Электрический контакт для вакуумных контакторов / К. К. Намитокоев, Д. П. Солопихин, И. Я. Суровцев. — Опубл. 25.03.74, Бюл. № 11.
6. *Воздвиженский В. А., Гончаров А. Ф., Козлов В. Б. и др.* Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями / Под общ. ред. В. Б. Козлова. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 200 с.
7. *Разработка и исследование низковольтных синхронных вакуумных контакторов:* Отчёт о НИР (промежуточ.). — Донбасский гос. техн. ун-т. — 2748ГД; № ГР 0105U007342. — Алчевск, 2006. — 67 с.
8. *Сокол А. А.* Низковольтные контакторы переменного тока на основе вакуумных коммутационных элементов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Харьков, 1987. — 23 с.
9. *Верхола А. В.* Методика обработки экспериментальных данных при измерении временных параметров синхронного вакуумного контактора // Вестник ХГПУ. — 2000. — Вып. 80. — С. 88—91.
10. *Верхола А. В.* Влияние износа контактов вакуумной дугогасительной камеры на величину времени упреждения синхронного вакуумного контактора // Вісник СНУ. — 2004. — № 12 (82). — С. 20—25.
11. *Потаренко А. А.* Перенапряжения при отключении шахтного асинхронного электродвигателя вакуумным выключателем // Вопросы электроснабжения угольных предприятий. Науч. сообщ. ИГД им. А. А. Скочинского. — 1977. — Вып. 156. — С. 32—38.
12. *Каганов З. Г.* Волновые напряжения в электрических машинах. — М.: Энергия, 1970. — 208 с.