

*О.Г. ВОЛКОВА*, ассистент, ЗНТУ, Запорожье  
*В.С. ЛУПИКОВ*, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков  
*Е.И. БАЙДА*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

## **СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЫВНЫХ КОНТАКТОВ ПРИ КОММУТАЦИИ**

Проблема электроэрозийного износа высоковольтных разрывных контактов требует дальнейшего совершенствования конструкции механизмов переключения коммутационных устройств с целью снижения энерговыделения на контактных поверхностях. Эффективным решением этого вопроса может стать замена шарнирных соединений в конструкциях механизмов быстрого действия на резинометаллические шарниры.

Проблема электроэрозийного износа высоковольтных разрывных контактов требует дальнейшего совершенствования конструкции механизмов переключения коммутационных устройств с целью снижения энерговыделения на контактных поверхностях. Эффективным решением этого вопроса может стать замена шарнирных соединений в конструкциях механизмов быстрого действия на резинометаллические шарниры.

**Введение.** Для электрических аппаратов, осуществляющих коммутацию цепи под нагрузкой, низкая стойкость их контактов представляет серьезную техническую проблему [1-3]. Многочисленные попытки решить эту задачу путем разработки новых контактных материалов, остаются не реализованными в полной мере. Чистых металлов (они составляют основу контактных материалов), совмещающих необходимые свойства высокой электропроводности, достаточной термостойкости и механической прочности не существует. Однако, с появлением технологий по созданию композиционных и порошковых материалов [3, 4] появилась возможность совмещать в одной структуре эти требования. Примером может служить группа разработанных материалов:

- медь-молибден (ММ70) с добавками кобальта (3, 5, 7, 10%);
- медь-молибден (ММ50) с добавками кобальта (2-3%);
- медь-молибден (ММ50 и ММ70) с добавками никеля 2-3%;
- медь-вольфрам (МВ80) с добавками никеля 2-3% и механической опрессовкой до 100 и 400 МПа;
- медь-вольфрам (МВ 70) с добавками кобальта (1, 3, 5, 7 %).
- вольфрамовая проволока диаметром 0,3 и 0,5 мм, пропитанная

медью (МВ50, МВ70) и др.

Подобные разработки базируются на внедрении в структуру медной матрицы компонентов, способных выдерживать большие термические нагрузки. Однако, как показывает опыт эксплуатации силовых коммутационных устройств, это не гарантирует высокую электроэрозионную стойкость их разрывных контактов с применением таких материалов. В процессе взаимодействия с дугowymi разрядами с ними также подвержены целому ряду деструктивных изменений [1, 2]. Например, под действием дуги медь, как легкоплавкая составляющая в структуре металлокерамических материалов, быстро испаряется из поверхностных слоев, обнажая структуру тугоплавких компонентов. Без достаточного теплоотвода, тугоплавкие компоненты оплавляются, образуя спекшуюся неоднородную корку толщиной менее миллиметра. Наличие такой корки ведет к неравномерному прогреву, а в дальнейшем, и росту термических напряжений на контактных поверхностях. Внешне это проявляется шелушением и растрескиванием поверхностных слоев. Такие процессы, часто происходят на фоне резкого изменения свойств рабочей среды (например, испарение и разложение трансформаторного масла), что способствует отслаиванию тугоплавкой корки на теле контакта. Наличие перечисленных факторов вместе с периодическими ударными нагрузками при замыкании контактов приводят к износу поверхностных слоев. Визуально это проявляется образованием мозаичной структуры и ростом шероховатости контактных поверхностей. Микровыступы этой структуры способны в дальнейшем притягивать опорные точки дуги, увеличивая продолжительность ее теплового воздействия. Наличие такой структуры указывает на обеднение поверхностного слоя легкоплавкой составляющей, что проявляется снижением теплоотвода с контактной поверхности и ростом контактного сопротивления. Типичная картина такого процесса показана на примере дугогасящего контакта контактора РПН (рис. 1,а).

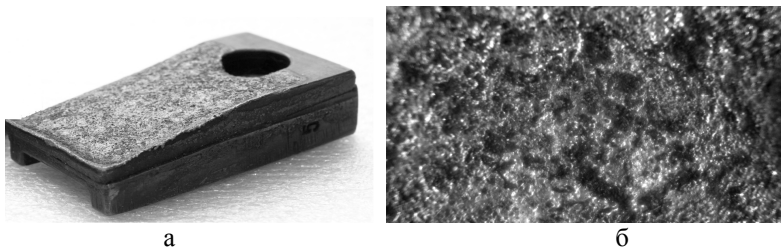


Рис. 1. Вид контакта контактора РПН (а) и его микроструктура.

На рис. 1,б видны мозаичные структуры спекшейся корки вольфрама и участки оплавления меди на поверхности металлокерамической напайки MB50. Дополнительно, следует обратить внимание на случаи нарушения крепления (расслоение) металлокерамических напаяк от температуры, проявляющиеся в процессе эксплуатации.

В результате анализа работы сильноточных разрывных контактов в конструкциях коммутационных устройств, можно прийти к выводу, что для решения проблемы электроэрозионного износа, только применения новых контактных материалов недостаточно. Следует одновременно продолжать поиски методов снижения энерговыделения на контактных поверхностях при размыкании.

**Цель работы** – анализ зависимости энерговыделения на поверхностях разрывных контактов от кинематики их движения при размыкании.

**Анализ влияния дуги на износ контактов.** Энерговыделение наиболее интенсивно проявляется при малых межконтактных расстояниях, когда практически вся энергия отключаемой цепи передается опорными точками дуги на локальные участки контактных поверхностей. Следовательно, чем короче по времени будет это воздействие и выше подвижность дуги, тем меньше степень электроэрозионного износа. О существующей связи между подвижностью опорных точек дуги и электроэрозионным износом указывается в работах [1, 5, 6].

Экспериментальные работы, проводившиеся Ведешенковым Н.А. в МЭИ, под руководством Буткевича Г.В. показали, что при токе 200 А соотношение удельных величин износа (частных от деления износа на время), вызванных малоподвижной дугой, к износу от быстро перемещающейся дуги, составляет от 3:1 до 30:1 (в зависимости от материалов) [7].

Под скоростью перемещения электрической дуги понимают скорость перемещения в межконтактном промежутке ионизированного электропроводящего объема рабочей среды, характеризуемого как тепловыми, так и электрическими параметрами [8, 9]:

$$\frac{dH_{\ominus}}{dt} = W_{\text{д}} - P ; \quad \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left( \frac{i^2}{U_{\text{д}}^2 \cdot g} - g \right),$$

где  $H_{\ominus}$  – энтальпия канала дуги;  $W_{\text{д}}$  – энергия канала дуги;  $P$  – энергия, отводимая в окружающую среду;  $g$  – проводимость дуги;  $\theta$  – постоянная времени проводимости;  $i$  – ток проходящий по каналу дуги.

Значение мощности отводимой в окружающую среду и подводимой по каналу дуги в динамическом процессе, можно оценить используя понятие изоэнергетического состояния [10]. Учитывая исходные

значения статической ВАХ канала дуги  $U_{Д}(i_{\theta})$ , полученные экспериментально и понятие мгновенного состояния тока в канале дуги  $i_{\theta}$ , можно записать:

$$P = U_{Д}(i_{\theta}) \cdot i_{\theta}; \quad U_{Д} = \frac{U_{Д}(i_{\theta})}{i_{\theta}} \cdot i.$$

Согласно модели Ридера и Урбанека [11], проводимость дуги можно выразить через косвенные характеристики ее плазмы:

$$g = e_{\text{Э}} \cdot n_{\text{Э}} \cdot b_{\text{Э}} \cdot \frac{S_{\text{С}}}{l_{\text{Д}}},$$

где  $e_{\text{Э}}, n_{\text{Э}}, b_{\text{Э}}$  – заряд, плотность и подвижность электронов в плазме дуги;  $S_{\text{С}}$  – поперечное сечение канала дуги;  $l_{\text{Д}}$  – длина дуги.

Понятие "постоянная времени дуги"  $\theta$  используется в переменных процессах для характеристики скорости изменения параметров (например, температуры, тока, проводимости) дуги, а ее значения пропорциональны внутренней энергии канала дуги. Величина энерговыделения электрической дуги на контактных поверхностях зависит от параметров тока, напряжения и проводимости и тесно связана с ее подвижностью.

Влиять на скорость перемещения дуги, без использования дугогасящих камер, можно путем изменения скорости расхождения контактов. Подтверждением этому могут служить работы [2, 7], указывающие на связь величины межконтактного зазора и состояния электрической дуги. Покадровое наблюдение скоростной съемки дугового процесса при размыкании позволяет выделить в ее поведении четыре характерных состояния (рис. 2), характеризующиеся скоростью и величиной межконтактного расстояния.

Первое состояние I наблюдается при минимальном межконтактном расстоянии, когда физический разрыв контактов только начал проявляться, а незначительная миграция канала дуги возможна только вблизи точки ее возникновения.

Второе состояние II допускает периодическое перемещения опорных точек дуги по поверхности контакта. Однако зона перемещения дуги достаточно локализована, а энерговыделение характеризуется большой концентрацией в пространстве.

Третье состояние III отличается резким увеличением скорости перемещения опорных точек дуги, расширением зоны энерговыделения в приконтактном пространстве.

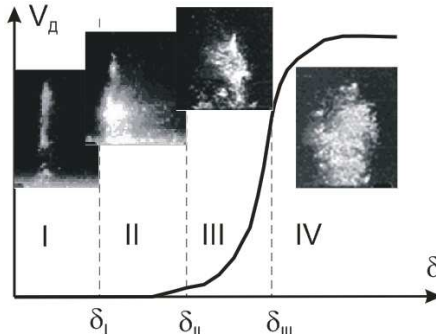


Рис. 2. Характерные состояния дуги при ее перемещении в межконтактном пространстве.

Четвертое состояние IV характеризуется высокой подвижностью дуги.

Считается, что на три первых малоподвижных состояния дуги приходится до 80 % от общих потерь контактного материала. Высокая подвижность дуги в четвертом состоянии приводит к рассеиванию ее энергии по большему объему приконтактного пространства, что снижает степень электроэрозионного износа. В этой связи механизм привода коммутационного аппарата должен обеспечивать максимально быстрый переход с начальных стадий размыкания контактов к состоянию с высокой подвижностью дуги, т.е. размыкание контактов на начальной стадии должно проходить максимально динамично. Однако реализация такой характеристики движения наталкивается на трудности, вызванные влиянием сил трения в подвижных соединениях механизмов.

**Оптимизация кинематики разрывных контактов.** Большие значения силы трения покоя в шарнирных соединениях вызывают замедленный разгон механизмов на начальной стадии размыкания контактов. Следовательно, при снижении влияния сил трения на работу механизма быстрого действия появляется реальная возможность оптимизации кинематики разрывных контактов.

Экспериментальное подтверждение этому было получено при исследовании работы механизма быстрого действия контактора РПН КНОА 110/1000. Его механизм представляет собой шарнирный двухкоромысловый четырехзвенник с пружинным замыканием, подвижность которого обеспечивается шарнирными соединениями, выполненными в виде подшипников скольжения. Учитывая, что в конструкциях контактов тумблерного типа рабочий ход звеньев имеет сравнительно не-

большие значения, предлагается заменить в нем шарнирные соединения на конструктивные элементы со свойствами высокой эластичности – резинометаллические шарниры (РМШ). На рис. 3 показана схема замены в механизме быстрого действия контактора шарнирных узлов (а) на РШМ (б). Конструктивно РШМ представляют собой коаксиально расположенные несоприкасающиеся втулки, между которыми помещен эластомерный материал, позволяющий реализовать относительные смещения втулок без проскальзывания за счет его деформации. РМШ, способны надежно работают в сложных условиях динамического нагружения радиальными и осевыми усилиями, а также скручивающего и изгибающего моментов. Однако, особо их отличает свойство легкости и быстроты перехода от состояния покоя к движению при приложении сдвигающего усилия. Реакция движения слоев полимера на приложенное усилие протекает значительно быстрее, чем преодолеваются сил трения покоя металлических поверхностей.

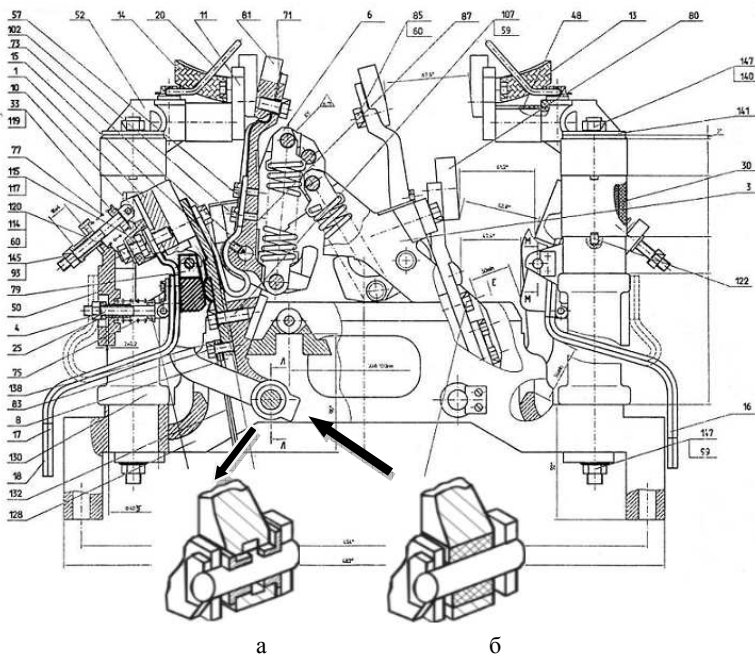


Рис. 3. Замена шарнирных узлов (а) на РШМ (б) в механизме быстрого действия контактора.

**Экспериментальные исследования.** Для проведения исследования на контактную систему механизма быстрого действия контактора был установлен реостатный датчик, позволяющий регистрировать перемещение подвижного контакта (рис. 4, а).

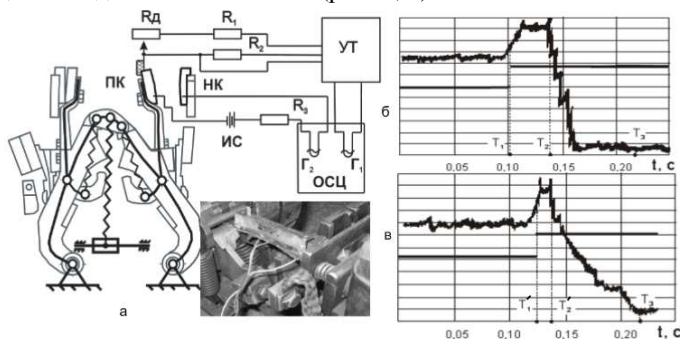


Рис.4. Схема и осциллограммы экспериментальных исследований механизма быстрого действия.

Сигнал от датчика ( $R_d$ ) согласно представленной схеме поступал на записывающую аппаратуру, включающую тензоусилитель (УТ) и светолучевой осциллограф (ОСЦ), где гальванометром  $\Gamma_1$  производилась запись движения разрывных контактов, а гальванометром  $\Gamma_2$  – фиксировался момент размыкания цепи. Источник питания (ИС) и величина сопротивлений  $R_1, R_2, R_3$  в схеме поддерживали величину тока в пределах 2 А.

На первом этапе эксперимента записывались осциллограммы движения контактов при существующей конструкции шарнирных узлов (рис. 4,б). На осциллограммы наглядно проявляется нерациональный характер движения контактов при размыкании. Например, начальная стадия процесса размыкания  $T_1 - T_2$  протекает очень медленно. Фактически на начальные стадии движения контактов, которые должны протекать максимально динамично, приходится не менее половины времени всего цикла. Последняя стадия движения  $T_2 - T_3$  протекает, наоборот, с излишне высокой скоростью, что приводит к ударному характеру замыкания контактов.

Второму этапу эксперимента предшествовала модернизация механизма путем замены цилиндрических шарниров в наиболее нагруженных узлах на РМШ (рис. 3,б). Втулки РМШ были помещены в предварительно рассверленные проушины шарнирных соединений и зафиксированы с помощью осей путем запресовки.

Запись осциллограммы движения контактов после модернизации показала существенные изменения в характере движения контактов. Динамичность начальной стадии движения по сравнению с первым этапом эксперимента возросла. Участок траектории движения ( $T_1 - T_2 = 0,008$  с) после модернизации был пройден значительно быстрее, чем до модернизации ( $T_1 - T_2 = 0,03$  с).

На основе полученных осциллограммы, были построены графики перемещения контактов, а путем графического дифференцирования и графики их скоростей. На рис. 5 показаны графики движения контактов до (а) и после (б) модернизации механизма быстрого действия. Цифрами обозначены: 1 – график перемещения контактов; 2 – график скорости контактов. Анализируя график скорости в начальной стадии переключения до модернизации можно выделить участок движения с крайне низкой скоростью (порядка 0,1-0,2 м/с) в течении  $\approx 0,01$  с. После установки РМШ, динамика движения на этом участке заметно возросла, таким образом эффект от модернизации позволит улучшить кинематику движения контактов при размыкании, а следовательно, увеличить скорость движения дуги и электроэрозионную стойкость контактов.

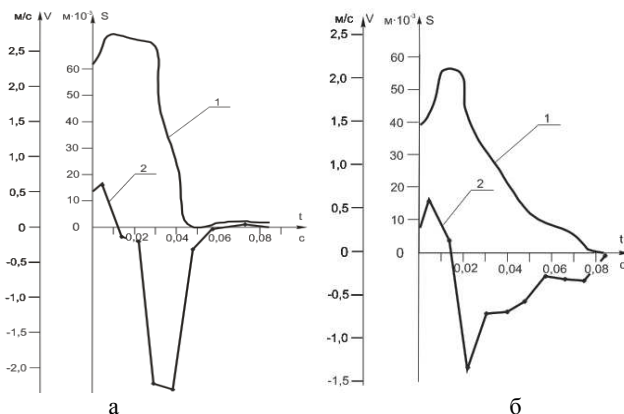


Рис. 5. Графики перемещения (а) и скорости (б) контактов.

Некоторые отличия в графиках движения на рис. 5,а и 5,б вызваны недостаточной согласованностью параметров податливости используемых РМШ и существующей конструкцией механизма быстрого действия. При возможности выбора размеров РМШ на основе предварительного расчета, эффект от их внедрения будет более очевиден.



## **Выводы:**

1. Как показывает анализ электроэрозионного износа сильноточных разрывных контактов, необходимо дальнейшее совершенствование методов по снижению энерговыделения на контактных поверхностях при коммутации.

2. На основании теоретического анализа установлена связь между величиной энерговыделения на контактных поверхностях и скоростью размыкания контактов.

3. Экспериментально показано, что силы трения в шарнирных соединениях механизма быстрогодействия не позволяют достичь оптимальной скоростной характеристики размыкания контактов. Начальная стадия их размыкания проходит очень медленно (порядка 0,1-0,2 м/с). Эффективным решением этой проблемы может стать замена шарнирных соединений в конструкции механизма быстрогодействия на резинометаллические шарниры. В результате такой модернизации продолжительность начальной стадии расхождения контактов сокращается в 3 раза.

**Список литературы:** 1. *Буткевич Г.В.* Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / *Г.В. Буткевич*. – М.: Энергия, 1973. – 263 с. 2. *Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов* / [*Г.В. Буткевич, Г.С. Белкин, Н.А. Ведешенков и др.*]. – М.: Энергия, 1978. – 256 с. 3. *Мышкин Н.К.* Электрические контакты / *Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М.* – Долгопрудный : Интеллект, 2008. – 560 с. 4. *Жаворонков М.А.* Исследование дугоустойчивости контактных материалов: Автореф. дис...канд. техн. наук: спец. / *М.А. Жаворонков*. – М., 1973. – 20 с. 5. *Бабаков Н.А.* Скорость движения короткой электрической дуги / *Н.А. Бабаков* // *Электричество*. – 1948. – № 2. – С. 74-77. 6. *Гольцман Э.Р.* Теоретические и экспериментальные исследования вопросов устойчивости и движения электрической дуги в аппаратах напряжением до 1000 В.: Автореф. дис...канд. техн. наук. – М.: МЭИ. – 1974. – 28 с. 7. *Порудоминский В.В.* Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой / *В.В. Порудоминский*. – М.: Энергия, 1974. – 288 с. 8. *Бикеев Р.А.* Динамические режимы в электромеханической системе дуговых сталеплавильных печей и их воздействие на вводимую активную мощность: дис. кандидата техн. наук: 05.09.10 / *Р.А. Бикеев*. – Новосибирск, 2004. – 229 с. 9. *Пентегов И.В.* Вопросы моделирования сварочной дуги как элемента электрической цепи / *И.В. Пентегов, В.Н. Сидорец, И.А. Генис* // *Автоматическая сварка*. – 1984. – № 10. – С. 18-23. 10. *Пентегов И.В.* Энергетические параметры в математической модели динамической сварочной дуги / *И.В. Пентегов, В.Н. Сидорец* // *Автоматическая сварка*. – 1988. – № 11. – С. 36-40. 11. *Garzon R.D.* High voltage breakers: design and applications / *R.D. Garzon*. – New York : Marcel Dekker, Inc. – 2002. – p. 456.



**Волкова Ольга Григорьевна**, ассистент кафедры ТОЭ Запорожского национального технического университета. Защитила диплом инженера в Запорожском национальном техническом университете по специальности "Электрические машины и аппараты" в 2005 г. Научные интересы связаны с повышением надежности электрических разрывных контактов.



**Луиков Валерий Сергеевич**, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера, диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1973, 1987 и 2004 гг. С 1973 по 1998 гг. работал в области магнетизма технических объектов. Заведующий кафедрой "Электрические аппараты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2005 г. Научные интересы связаны с проблемами электромагнитной совместимости технических средств, магнетизмом технических объектов, магнитной левитацией, физическими полями электрических аппаратов.



**Байда Евгений Иванович**, канд. техн. наук, доцент кафедры "Электрические аппараты" НТУ "ХПИ". Кандидатскую диссертацию защитил в 1999 г. Научные интересы – математическое моделирование процессов в электромагнитных, тепловых полях.

*Поступила в редколлегию 19.04.2011  
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*