

**О.К. Маренич, И.В. Ковалёва /к.т.н./**  
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ АЗ7ХХ КАК ФАКТОР ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЕГО ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОГО СОСТОЯНИЯ

*На основании исследования технического состояния элементов конструкции автоматического выключателя А 3792, прошедшего цикл многократных коммутаций силовой электрической цепи, установлены факторы, определяющие возможность возникновения междуфазной проводимости в зоне перемещения силовых контактов.*

**Ключевые слова:** автоматический выключатель, дугогасительная камера, электрический ток, короткое замыкание, электрическая дуга, ионизация, междуфазная проводимость.

### Постановка проблемы

Автоматический выключатель АЗ7ХХ на протяжении длительного времени является основным, единственным силовым коммутационным аппаратом, выполняющим функцию оперативной подачи/снятия напряжения питания трехфазной электросети участка шахты и автоматического отключения этой сети в случае возникновения аварийных (опасных) состояний, в частности коротких замыканий.

Благодаря своей высокой коммутационной способности (от 17 до 24 кА) соответствия рабочей проводимости и номинального напряжения параметрам шахтных участковых электросетей, наличию всех видов расцепителей, реагирующих на аварийные состояния сети, эта серия коммутационных аппаратов стала базой создания рудничных автоматических выключателей серии АВ и распределительных устройств низкого напряжения РУНН всего типажного ряда комплектных участковых трансформаторных подстанций (КТП типов ТСВП, КТПВ ВСПП и т.п.).

Это позволило не только обеспечить разработку и применение комплектных трансформаторных подстанций мощностью 400 кВА и более, но и существенно повысить эффективность и безопасность эксплуатации рудничных участковых электросетей номинального линейного напряжения 660 В, вытеснить из эксплуатации автоматические фидерные выключатели (АФВ), отличающиеся целым комплексом недостатков [1].

Многолетний успешный опыт эксплуатации аппаратов АЗ7ХХ в шахтных сетях напряжения 660В послужил основой для разработки модификации АЗ792У2, адаптированной к промышленной электросети номинального линейного напряжения 1140 В.

Эксплуатация данного выключателя в шахтной участковой электросети указанного напряжения (в составе РУНН КТП и аппаратов АВ) подтвердила рациональность его параметров и схемы.

Однако при эксплуатации автоматического выключателя был выявлен неблагоприятный эффект, суть которого состоит в возникновении междуфазной (трехфазной) проводимости в зоне расположения силовых контактов в момент перемещения подвижной силовой контактной группы в процессе включения аппарата (АЗ792) после автоматического его срабатывания на отключение междуфазного короткого замыкания (к.з.) сети.

Зафиксированные аварийные (опасные) состояния выключателя АЗ792У2 в сети линейного напряжения 1140 В, в основном, приходится на случаи, когда речь шла об автоматическом отключении междуфазных к.з., возникших в отходящем присоединении в непосредственной близости от выхода КТП при мощности подстанции 630 кВА и выше (т.е. в зоне максимальных токов к.з.).

Имеющаяся информация, полученная от эксплуатационных служб различных предприятий, позволяет сделать вывод о том, что описанный прецедент является повторяющимся, что определяет актуальность разработки технических решений по предупреждению возникновения междуфазных проводимостей в элементах аппарата АЗ792, либо замены данного аппарата на высоковольтный автоматический выключатель, что потребует значительных материальных затрат, существенно увеличит габариты и усложнит конструкцию РУНН КТП, группового автоматического выключателя технологического участка шахты.

**Анализ последних исследований и публикаций**

Процесс образования электрической дуги при коммутации силовой электрической цепи описан в [2...5]. В частности, рассмотрена физика ионизационных процессов и методы эффективного дугогашения, адаптированные к применению в конструкции автоматических выключателей. Это дает основания делать предположение об электроионизационных процессах как о причине формирования путей утечки в автоматическом выключателе вследствие медного напыления на поверхность электроизоляционных деталей. Детально физика силовых электрических дуг освещена в работе [2], где особое внимание уделено анализу экспериментальных исследований процессов в системе «эмитирующий катод – прикатодная плазма», что подтверждает обоснованность ранее выдвинутого предположения.

Вопросам повышения эффективности контактно-дугогасительных систем силовых коммутационных аппаратов посвящено исследование [6]. В нем установлены зависимости дифференциального сопротивления дуги от тока гашения, что позволяет делать вывод о приемлемости применения технических средств токоограничения, функционирующих в момент возникновения и в процессе отключения цепи к.з. в силовом присоединении автоматического выключателя. Общие сведения о конструкции автоматического выключателя АЗ7ХХ (включая типоразмер АЗ792) содержатся в [1,7], что способствует формированию объективных выводов о возможности формирования путей междуфазных утечек в элементах его конструкции вследствие электроионизационных воздействий. В комплексе упомянутые публикации и научные результаты позволяют сформулировать цель и задачи актуальных исследований.

**Цель (задачи) исследования**

Целью исследования является выявление элементов в конструкции автоматического выключателя АЗ792, позволяющих при наличии экстремальных электроионизационных процессов, сопровождающих коммутацию силовых присоединений в состоянии токовой перегрузки, создавать междуфазную электрическую проводимость.

Для достижения этой цели рационально исследование технического состояния элементов силовой контактной группы, дугогасительных камер и корпусных деталей автоматического выключателя АЗ792, прошедшего многократные циклы коммутации номинальных токов нагрузки (630А) и токов перегрузки.

**Основной материал исследования**

Учитывая специфику возникновения междуфазных коротких замыканий внутри конструкции автоматического выключателя АЗ792, происходящих после защитного отключения к.з. в отходящем присоединении в момент повторного перемещения подвижных контактов, представляется целесообразным рассмотреть конструктивные элементы этого выключателя, находящиеся в зоне расположения силовых контактов, на предмет выявления их способности создавать дополнительные пути утечки (рис. 1). Применительно к силовым контактным группам практический интерес представляет исследование технического состояния подвижных и неподвижных контактов дугогасительных камер, геометрии указанных элементов.

Рассматривая конструктив размещения подвижного силового контакта 1 в полости дугогасительной камеры 2, следует отметить весьма малую величину зазора между контактом и пластинами дугогасительной решетки камеры. Так, при ширине подвижного контакта 26,7 мм ширина прилегающей полости дугогасительной камеры составила 28,1 мм, что определило величину зазора с каждой стороны в 0,7...0,8 мм.

Техническое состояние силовых контактов, многократно выполнявших отключение промышленной электросети с номинальной активной индуктивной нагрузкой и в состоянии перегрузки, позволяет сделать вывод о высокой степени вероятности термического деформирования поверхности силовых контактов как реакции на воздействие электрической дуги, образующейся при коммутационном процессе. Так, в контактной группе со следами интенсивного электродугового воздействия зафиксированы наплавления высотой до 1,4 мм относительно плоскости контакта (рис. 2а), что в сравнении с исправной контактной группой (рис. 2б) существенно уменьшает площадь контакта и провоцирует еще большую тепловую перегрузку. Появление таких аномальных поверхностей силовых контактов обусловлено процессом формирования струи жидкого металла (адиабатический процесс) в межконтактном промежутке. В частности, минимальное термически стойкое сечение струи для определенного времени нагрева определяется выражением [6]:

$$S_T = \frac{I}{a} \cdot \sqrt{t_n} \quad (1)$$

где  $I$  – ток в струе;  $t_n$  – время нагрева струи;  $a$  – параметр, зависящий от физических свойств жидкого металла, определяется по следующему выражению:



Рис. 1. Общий вид силовой трехполюсной контактной группы автоматического выключателя А3792:

1 – подвижный контакт; 2 – дугогасительная камера; 3 – рукоятка выключателя

$$\begin{aligned}
 a = & \left( \frac{\gamma_{нл} \cdot c_{нл}}{\rho_{нл} \cdot a} \left( \ln \frac{1 + \alpha \cdot (T_1 - T_{нл})}{1 + \alpha \cdot (T_o - T_{нл})} + \right. \right. \\
 & + (\beta + \xi) \left[ T_1 - T_o - \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1 + \alpha \cdot (T_1 - T_{нл})}{1 + \alpha \cdot (T_o - T_{нл})} \right] + \\
 & \left. \left. + \beta \cdot \xi \left[ \frac{T_1 - T_2}{2} - \left( \frac{1}{\alpha} + T_{нл} \right) \cdot (T_1 - T_o) + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + \frac{1}{\alpha^2} \ln \frac{1 + \alpha \cdot (T_1 - T_{нл})}{1 + \alpha \cdot (T_o - T_{нл})} \right] \right] \right)^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \quad (2)$$

В выражении (2)  $\gamma_{нл}$ ,  $c_{нл}$ ,  $\rho_{нл}$  – плотность, удельная теплоемкость, удельное сопротивление жидкого металла при температуре плавления  $T_{нл}$ ;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\xi$  – температурные коэффициенты удельного сопротивления, удельной теплоемкости и плотности жидкого металла;  $T_o$  – начальная температура

жидкого металла;  $T_1$  – конечная температура, принимается различной в зависимости от конструкции и режима работы коммутационного аппарата (может быть равна либо температуре кипения жидкого металла, либо меньшей температуре).

При этом максимальная плотность тока термической стойкости в струе жидкого металла равна [6]:

$$\delta_T = a \cdot \sqrt{\frac{v}{l}}, \quad (3)$$

где  $l$  – длина жидкометаллической струи, м,  $v$  – скорость жидкого металла в струе, м/с.

Таким образом, износ поверхностей силовых контактов автоматического выключателя А3792, вызванный воздействием электрической дуги в



а



б

Рис. 2. Состояния поверхности силовых контактов автоматического выключателя А3792: а – подвергшихся электродуговому воздействию в процессе отключения высоких токов; б – нормальное состояние контактов

ходе его эксплуатации, является вероятным и должен учитываться при моделировании процессов воздействия дуги на поверхности прилегающих элементов его конструкции.

Показательно, что наиболее интенсивным оплавлениям подвергаются нижние части подвижного и неподвижного силовых контактов. Частично это объясняется особенностями конструкции дугогасительной камеры, где зона коммутации нижних частей силовых контактов с обеих сторон охвачена керамическими накладками специальной формы с максимальными габаритами 51,5×26,9 мм (рис. 3а). Показательно, что на керамических накладках имеется нагар, а металлическая дугогасительная решетка имеет многочисленные выгорания и оплавления (рис. 3б), что свидетельствует о вероятности воздействия электродуговых коммутационных процессов на элементы конструкции дугогасительных камер.

С учетом отсутствия дугогасительного эффекта в местах перемещения нижних частей силовых контактов и крайне малых величин зазоров между ними и керамическими накладками, резонно предположить, что при отключении чрезмерно высоких токов трехфазного к.з. в сети напряжения 1140 В, именно на поверхностях керамических накладок и близлежащих поверхностях вследствие энергетика (термоэлектронная и автоэлектронная эмиссия) электрических дуг произойдет напыление металлом силовых контактов выключателя (медью).

Рассмотрим конструкцию корпусных деталей автоматического выключателя АЗ792, прилегающих к нижним частям дугогасительных камер (рис. 4). В базовой части корпуса, выполненного из термостойкого и трекингоустойкого полистирола, практический интерес представляют форма и размеры изоляционного ребра между полостями

ми размещения дугогасительных камер. В средней части ребра (шириной 9,3 мм), в углублении (глубина 9 мм) предусмотрена стеклотекстолитовая прокладка, выступающая из полости ребра на 3,6 мм (на рис. 4 не показана), которая входит в соответствующую полость крышки отсека дугогасительных камер. Такое исполнение исключает междуфазный электрический пробой через электроизоляционное ребро в пределах размещения стеклотекстолитовой прокладки.

Однако обращает на себя внимание наличие медного налета на полости нижней части изоляционного ребра 1, на поверхности текстолитовой изоляционной вставки 2 (ограждающей механизм свободного расцепления) и на фрагментах деталей, охватывающих указанную текстолитовую вставку. Именно нижняя часть изоляционного ребра непосредственно сопряжена с полостью максимально интенсивного дугообразования (нижние части коммутируемых силовых контактов).

Здесь имеется площадка шириной 3,6 мм, не отгороженная между фазами изоляционными ребрами. Геометрически размеры изоляционного промежутка между фазами при отсутствии токопроводящей поверхности и с учетом наличия прилегающей крышки дугогасительных камер позволяют исключить междуфазный электрический пробой. В этом случае пробивное напряжение рассчитывается на основе классических методов:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \quad (4)$$

где  $E_{np}$  – электрическая прочность диэлектрика, кВ/м;  $U_{np}$  – пробивное напряжение, кВ;  $h$  – толщина диэлектрика в месте пробоя, м.



а



б

Рис. 3. Дугогасительная камера автоматического выключателя АЗ792 со следами электродугового воздействия при коммутации высоких токов: а – керамическая накладка в нижней части камеры со следами теплового воздействия электрической дуги; б – медные наплавления на дугогасительной решетке камеры



Рис. 4. Фрагмент основания корпуса автоматического выключателя А3792: 1 – электроизоляционное ребро, отделяющее силовые контактные группы полюсов разных фаз и их дугогасительные камеры; 2 – текстолитовая изоляционная вставка, ограждающая механизм свободного расцепления

Однако в случае контактного отключения сверхвысоких токов при напряжении свыше 1000 В вероятен ионизационный пробой, тем более, если медное напыление охватывает всю междуфазную поверхность диэлектрического корпуса в местах, приближенных к силовым контактам автоматического выключателя. Этот вид пробоя сопровождается действием на диэлектрик химически агрессивных веществ, образующихся в газовых порах диэлектрика при частичных разрядах в газе, а также эрозией диэлектрика на границе пор ионами газа. Здесь пробой воздуха обусловлен явлениями ударной и фотонной ионизации и подчинен действию закона Пашена, в соответствии с которым пробивное напряжение воздуха пропорционально произведению давления воздуха  $P$  на расстояние между электродами  $h$  (рис. 5) [3].

Таким образом, в результате проявления электроионизационных процессов медное напыление появляется на поверхностях пластин дуго-

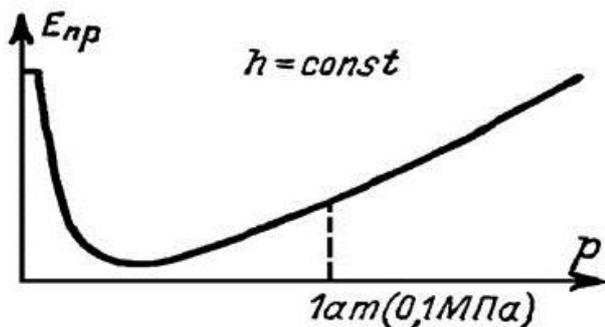


Рис. 5. Форма зависимости электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном поле

гасительных камер (см. рис. 1, наиболее интенсивно – средняя фаза), на электроизоляционных поверхностях корпусных деталей. Это существенно сокращает путь утечки и создает электрическую проводимость между фазами через щель, образуемую прилеганием крышки дугогасительных камер к базовой части корпуса, что и подтверждается наличием медного налета на поверхности изоляционного ребра, разделяющего области коммутируемых контактов разных фаз.

#### Выводы

Исследованием установлено свойство конструкции дугогасительных камер автоматического выключателя А37ХХ препятствовать снижению тепловых нагрузок, формируемых в нижних частях коммутируемых силовых контактов в случае дугообразования при коммутации значительной нагрузки.

Возникающие электроизоляционные процессы значительной мощности (при разрыве цепи междуфазного к.з. в сети напряжения 1140 В) способны вызывать омеднение поверхностей сопряженных деталей, что выявлено на примере исследования конкретного образца. При этом установлены свойства конструкции корпуса автоматического выключателя А37ХХ создавать междуфазные пути утечки по поверхностям изоляционных компонентов в случае их омеднения.

Направлением дальнейших исследований является установление фактических параметров электроионизационных процессов, обусловленных дугообразованиями при коммутации токов к.з. и свойств токоограничительных устройств, действующих в процессе их отключения.

**Список литературы**

1. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / В.С. Дзюбан [и др.]; под ред. Б.Н. Ванева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Юго-Восток Лтд, 2001. – Т.2. – 440 с.
2. Горячев, С.В. Экспериментальное исследование прикатодной области сильнотоочных электрических дуг: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.08 / Горячев Сергей Викторович. – Москва, 2010. – 178 с.
3. Жуков, М.Ф. Динамика паров металла в пристеночных слоях плазмы / М.Ф. Жуков [и др.]. – ДАН СССР. – 1981. – №6. – Т. 260. – С. 1354.
4. Стенин, В.В. Особенности эрозии термоэмиссионного катода / ТВТ. – Москва: Наука, 1985. – Т.23. – С. 858-862.
5. Кирсанов, А.В. Оптимизация эксплуатации электрических аппаратов в энергетических системах, оборудованных средствами телемеханики: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Кирсанов Алексей Валерьевич. – М., 2005. – 133 с.
6. Воронин, А.А. Повышение эффективности контактно-дугогасительных систем сильнотоочных коммутационных аппаратов с удлиняющей дугой: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Воронин Александр Анатольевич. – Самара, 2009. – 178 с.
7. Выключатели автоматические А3790: техническое описание и инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс] // АО «Контактор»: завод электротехнической промышленности. – Москва, 2017. – Режим доступа: [https://www.kontaktor.ru/upload/iblock/ad1/A3790\\_TO.pdf](https://www.kontaktor.ru/upload/iblock/ad1/A3790_TO.pdf)

**О.К. Marenich, I.V. Kovaljova /Cand. Sci. (Eng.)/**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**DESIGN ELEMENTS OF AUTO SWITCH A37XX AS A FACTOR OF OCCURRENCE OF ITS POTENTIALLY DANGEROUS STATE**

**Background.** Automatic power switch A3792 is a reliable device in the mine section electrotechnical complex with voltage 660 V. It can be used in a network with voltage 1140 V expediently also. However, there are cases when, after turning off ultrahigh short-circuit currents, conduction between phases occurs inside the circuit breaker. This leads to damage. It is important to find out the reason for such a phenomenon.

**Materials and/or methods.** The reasons for the appearance of conduction between phases in the design of the A3792 circuit breaker can be identified as a result of studying the design of this device after performing multiple cycles of disconnecting the electric current overload, including short circuits. The obtained results should be compared with the theoretical prerequisites for the occurrence of conductivity between phases over dielectric surfaces.

**Results.** When turning off ultrahigh currents, the temperature effect of an electric arc can damage the surface of the power contacts of the circuit breaker. Ionization processes that occur when an electric arc is burning between the power contacts of a switch are the cause of copper deposition on the dielectric surfaces of a circuit breaker. The most extreme thermal and ionization conditions created by the design of the lower part of the arcing chamber and the dielectric enclosure between the switching devices of different phases.

**Conclusion.** The studies confirmed the ability of the A3792 circuit breaker to create conductivity between phases after the process of turning off ultrahigh currents, such as short-circuit currents in an electrical network with a voltage of 1140 V. Using a circuit breaker with a special design is very expensive and impractical for normal operating conditions. Operation of the A3792 circuit breaker in an electrical network with a voltage of 1140 V is possible if additional devices are used to limit the currents of extreme modes.

**Keywords:** automatic switch, interrupter chamber, electric current, short circuit, electric arc, ionization, interfacial conductivity.

**Сведения об авторах**

**О.К. Маренич**

Телефон: +380 (71) 317-32-09  
 Эл. почта: marenich13@gmail.com

**И.В. Ковалёва**

SPIN-код: 5187-2555  
 Телефон: +380 (71) 334-91-00  
 Эл. почта: visara85@mail.ru

*Статья поступила 05.10.2018 г.  
 © О.К. Маренич, И.В. Ковалёва, 2018  
 Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский*