

УДК 622.647.1

О.К. Маренич

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

Е.В. Золотарёв

ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащитного и рудничного электрооборудования» (Донецк)

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ЦЕПИ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Разработана схема стенда и выполнены экспериментальные исследования концептуальной схемы ограничения энергетических показателей плазмообразования в силовых контактных группах автоматического выключателя А3792У шахтной комплектной трансформаторной подстанции при отключении междуфазных коротких замыканий. Подтверждены предположения о возможности повышения ресурса автоматического выключателя на основе использования дополнительных быстродействующих устройств ограничения продолжительности протекания тока короткого замыкания в процессе его защитного отключения.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, трансформаторная подстанция, автоматический выключатель, короткое замыкание, электрическая дуга, ресурс, ускоренное обесточивание, схема, экспериментальные исследования, анализ.

Постановка проблемы

Применение на угледобывающих предприятиях электромеханического оборудования высокой мощности стало общепринятой в мире тенденцией и предопределило перевод систем электропитания технологических участков шахт на номинальные напряжения высоких уровней [1,2]. В этих условиях адаптация низковольтного автоматического выключателя (АВ) А37ХХ к трехфазным электрическим сетям линейного напряжения 1140 В является экономически обоснованным решением, поскольку позволяет существенно сократить расходы на проектирование, производство и эксплуатацию шахтных участковых комплектных трансформаторных подстанций (КТП) высокой мощности. Опыт эксплуатации таких адаптированных автоматических выключателей (А3792У) в целом показал их достаточные функциональные возможности в области коммутации рабочих нагрузок, однако выявил проблемные вопросы, связанные с последствиями коммутационных плазмообразований при отключении междуфазных коротких замыканий, возникающих в непосредственной близости от трансформаторной подстанции. В частности, зафиксированы единичные случаи внутреннего пробоя междуфазных полюсов автоматического выключателя после процедуры отключения внешнего междуфазного короткого замыкания (КЗ).

Исследованиями [3] выявлено наличие металлизации диэлектрических элементов конструкции автоматического выключателя вблизи силовых контактных групп, что с учетом теоретических положений в области коммутационного плазмообразования в силовых электрических цепях [4,5] дает основания к исследованиям и разработкам в области снижения энергетических параметров электрической дуги в силовых контактных группах автоматического выключателя А3792У при отключении внешних междуфазных КЗ. Безусловный практический интерес представляют результаты экспериментов в этой области.

Анализ последних исследований и публикаций

Принимая во внимание концепцию коммутационного плазмообразования [6] при отключении тока КЗ сети напряжения, превышающего 1000 В, в качестве основной причины металлизации внутренних диэлектрических элементов автоматического выключателя А3792У, теоретические положения [5], согласно которым фактором снижения энергетических показателей плазмообразования является сокращение продолжительности данного процесса, а также наличие задержки времени на формирование плазмы, обусловленное временем нагрева металла кон-

тактов выключателя до температуры испарения, представляется целесообразным применить дополнительные технические решения для быстрого действующего автоматического разрыва цепи КЗ в качестве средства, повышающего ресурс автоматического выключателя АЗ792У при эксплуатации в составе КТП в шахтной электросети напряжения 1140 В. Согласно [7], для данных целей может быть предложен способ разрыва цепи «звезда» вторичной трехфазной обмотки трансформатора КТП. С этой целью фазные обмотки трансформатора могут быть подключены к входу силового мостового выпрямителя, нагрузкой которого может быть предохранитель (перегорающий при возникновении тока КЗ) либо однополюсный контактор, отключаемый по команде устройства максимальной токовой защиты (МТЗ). Эффективность такого решения может быть выявлена по факту одновременного либо опережающего срабатывания по отношению к процессу отключения АВ КТП на основе анализа измеренных параметров. Этим определяется актуальность экспериментальных исследований в данной области.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является установление фактических функциональных возможностей концептуальной схемы ограничения энергетических параметров коммутационного плазмообразования при отключении автоматическим вы-

ключателем АЗ792У тока трехфазного короткого замыкания на основании результатов экспериментов.

Условием достижения этой цели является решение задачи создания экспериментального стенда, программы, методики и собственно выполнения экспериментов в условиях эксплуатации силовой электрической схемы с цепью трехфазного короткого замыкания при формировании токов КЗ различной величины.

Основной материал исследования

Применительно к концептуальной схеме устройства ограничения энергетических показателей плазмообразования при отключении короткого замыкания (рис. 1) специфика экспериментов заключается в практической невозможности их проведения на реальном объекте ввиду крайне высоких мощностей реальных трехфазных коротких замыканий в промышленной электросети линейного напряжения 1140 В, в присоединениях трансформаторных подстанций высоких мощностей (630 кВА, 100 кВА, 1250 кВА, 1600 кВА и т.п.). Подобные опыты, предполагающие создание реальных междуфазных КЗ, характеризуются опасностью воспламенения силового электрооборудования и защитным отключением силовых высоковольтных коммутационных устройств в муниципальных электрических сетях внешних присоединений.

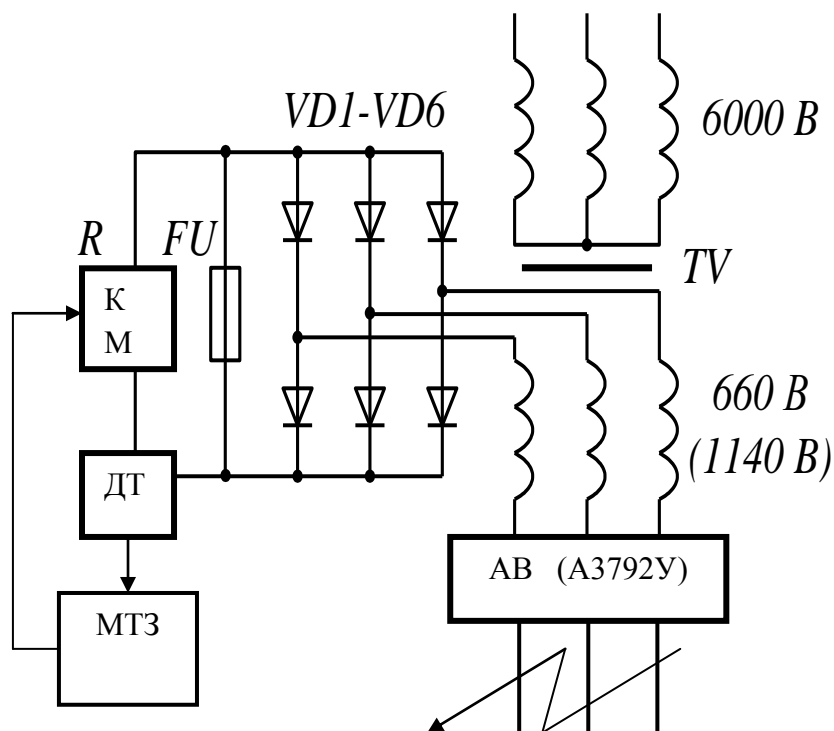


Рис. 1. Концептуальная схема реализации принципа ограничения энергетических показателей плазмообразования в автоматическом выключателе АЗ792У при отключении цепи внешнего короткого замыкания

В связи с этим целесообразно исследование физической модели с масштабированием параметров реального объекта. Практическую актуальность представляет выяснение возможностей предохранителя как сопутствующего защитного элемента, последовательно соединенного в цепи силовых контактов автоматического выключателя, ускоренно либо совместно с другими видами максимальных токовых защит реагировать на междуфазные КЗ в присоединении, отходящем от АВ. В этой связи в качестве сопоставимых средств максимальной токовой защиты должны рассматриваться расцепители максимального тока АВ, а также дополнительная внешняя максимальная токовая защита, воздействующая на независимый расцепитель АВ. Поскольку оперативным параметром реагирования выступает электрический ток, в составе экспериментального стенда предусмотрен регулируемый трехфазный источник тока.

Указанные соображения определяют структуру лабораторного стенда (рис. 2). Трехфазное линейное напряжение сети 380 В преобразуется силовым автотрансформатором TV1 (АТМК-250) в трехфазное напряжение регулируемой величины в диапазоне от 5 В до 400 В. В последующем это напряжение поступает на нагружающий силовой трансформатор TV2 (ТСУ-160), имеющий понижающий коэффициент транс-

формации $k_{mp}=10$. Это создает возможность подключить к выходу вторичной трехфазной обмотки трансформатора TV2 цепь трехфазного КЗ и создать в ней ток до 6000 А. В качестве внешней цепи трехфазного КЗ, подключаемой к выходу АВ (А3792У), могут быть использованы медные плавкие элементы предохранителей FU1, FU2, состоящие из расчетного количества провода из материала «медь» марки М1р ГОСТ 859-78. В результате измерения диаметра d проводника рассчитывается ток его плавления $I_{пл} = 80\sqrt{d^3}$ и определяется необходимое количество параллельных проводников применительно к расчетному значению этого тока.

В качестве внешнего устройства максимальной токовой защиты принимаем серийное изделие БЗУ-ТП, применяющееся в шахтных участках КТП серии ТВПШ. Его схема предполагает воздействие на независимый расцепитель АВ [8].

Альтернативой по отношению к применению предохранителя в схеме ограничения энергетических параметров цепи КЗ может быть применение контактора в цепи нагрузки выпрямителя (см. рис. 1), отключаемого по сигналу максимальной токовой защиты. Временной интервал срабатывания контактора не должен зависеть от величины тока в защищаемой сети.

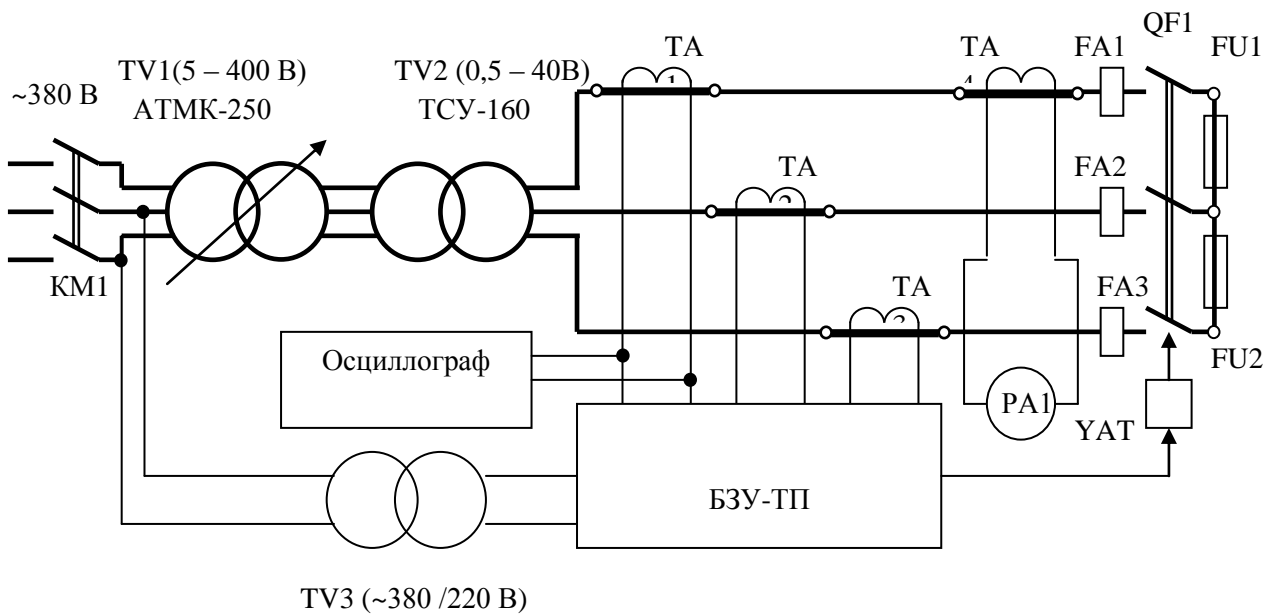


Рис. 2. Схема лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований параметров токоограничителя цепи отключения междуфазного короткого замыкания:

- TV3 – трансформатор питания схемы; ТА1...ТА4 – трансформаторы тока;
- РА1 – амперметр; КМ1 – контактор пускателя; QF1 – контактная группа АВ (QF) А3792;
- FA1...FA3 – расцепители максимального тока АВ; YAT – независимый расцепитель АВ;
- FU1...FU2 – плавкие предохранители, БЗУ-ТП – блок защиты и управления КТП

При этом сигнал на срабатывание может быть сформирован как штатным устройством защиты (БЗУ-ТП), так и дополнительным специальным устройством, выполненным на основе измерения выходного сигнала встроенного датчика тока контактора. В связи с этим схема стенда (рис. 2) должна быть преобразована к виду, когда к выходу автоматического выключателя QF1 вместо плавких элементов предохранителей FU1, FU2, будет присоединён однополюсный вакуумный контактор (между двумя силовыми выводами QF1), включенный в исходном состоянии и отключаемый по команде блока БЗУ-ТП либо сигналом иной внешней максимальной токовой защиты. Фиксация измеряемых параметров в ходе экспериментов осуществляется цифровым осциллографом.

В ходе проведения экспериментов установлено, что наиболее характерными выявленными состояниями элементов защиты являются:

- отключение автоматического выключателя по сигналу БЗУ-ТП и целостность плавкого элемента;
- синхронное отключение автоматического выключателя по сигналу БЗУ-ТП и перегорание

плавкого элемента;

– перегорание плавкого элемента за время, недостаточное для срабатывания БЗУ-ТП (рис. 3). Автоматический выключатель АЗ792У остается во включенном состоянии после перегорания плавких элементов в цепи нагрузки. Примеры осциллограмм токов в силовой цепи короткого замыкания приведены на рис. 3, рис. 4, результаты измерений – в табл. 1. Осциллографированием определены амплитуда тока, продолжительность КЗ до начала перегорания плавкого элемента (момент t_1), отключения силовой цепи.

При анализе результатов экспериментов учитывалось, что величина тока в цепи КЗ определяется величиной приложенного линейного напряжения (к шинам АВ), а также величиной сопротивления плавкого элемента (регулируется в зависимости от количества параллельно присоединенных плавких элементов).

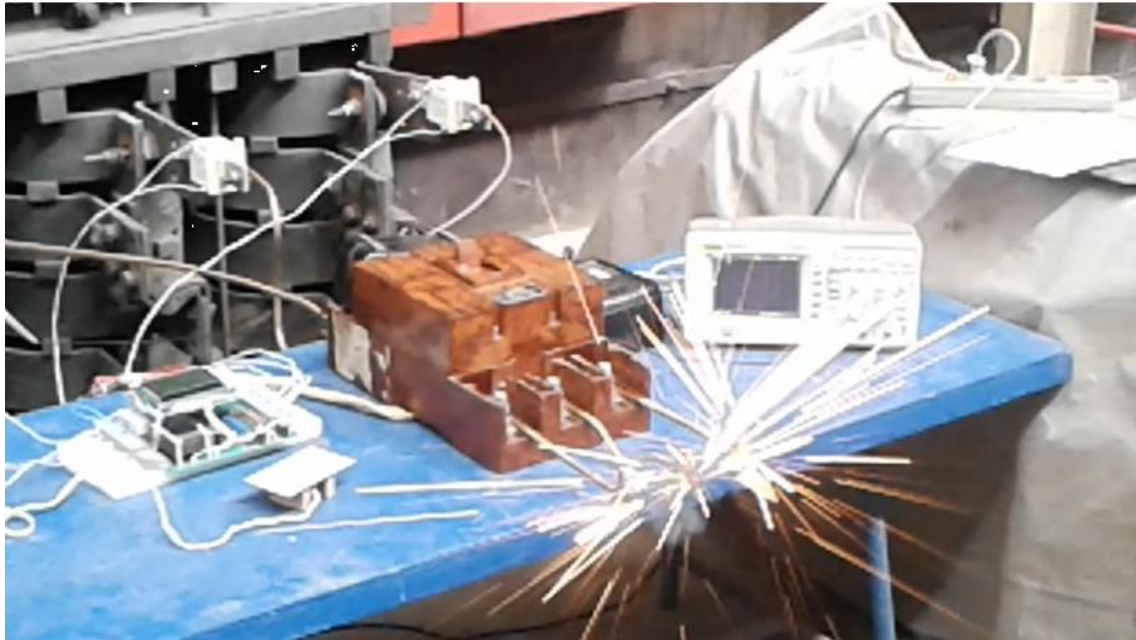
При этом в соответствии с техническими характеристиками общее время срабатывания МТЗ БЗУ-ТП составляет 0,07...0,10 с, включая 0,02...0,03 с – время реагирования БЗУ-ТП на ток КЗ и 0,05...0,07 с – собственное время отключения автоматического выключателя АЗ792У.

Табл. 1. Повторяющиеся параметры исследуемого объекта, зафиксированные в ходе экспериментов

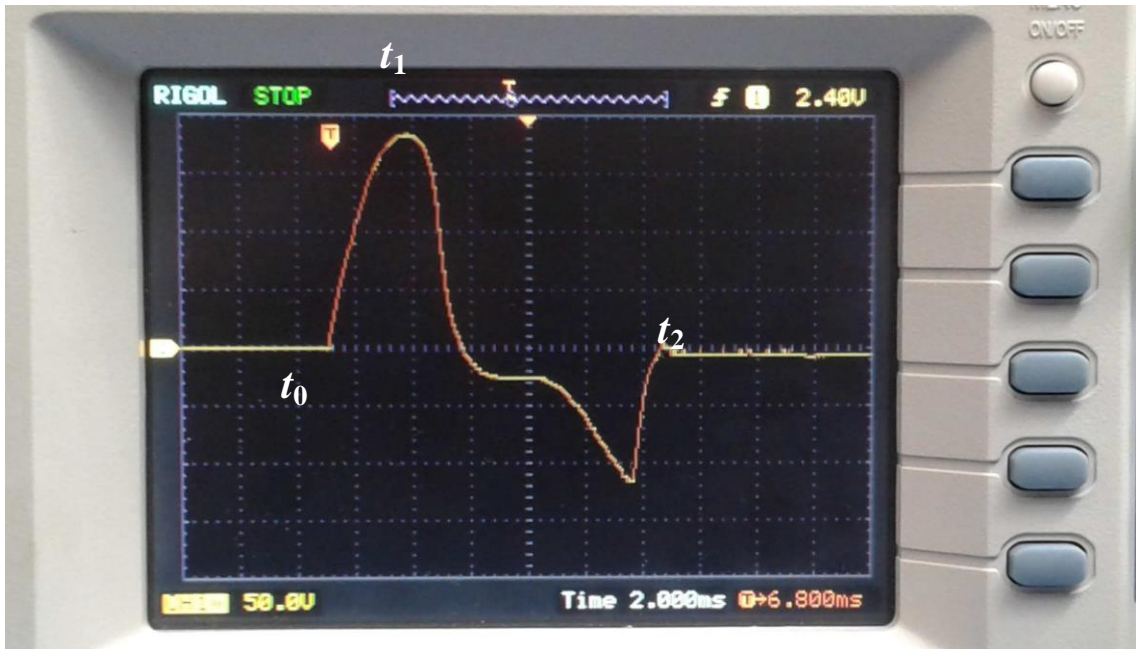
№ п/п	Напряжение линейное между шинами АВ, В	Ток уставки МТЗ типа БЗУ-ТП, А	Сечение медного плавкого элемента, мм ²	Длительный ток плавления плавкого элемента, А	Объекты, отключившие ток КЗ	Амплитуда тока, А (действующее значение тока А)	Продолжительность процесса до защитного отключения, с
1	2,0	501	3×0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП	537; (381)	0,306
2	5,0	501	3×0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП	1012; (718)	0,055
3	10,0	501	3×0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП	1898; (1346)	0,062
4	15,4	501	3×0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП и плавкий элемент	2538	0,049
5	20,1	501	3×0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП и плавкий элемент	3988	0,029 ($\Delta t=0,014$ с)
6	25,5	501	3×0,52	180	Плавкий элемент	4292	0,0059 ($\Delta t=0,0015$ с)
7	2,6	600	2×0,52	120	АВ по команде БЗУ-ТП	631; (448)	0,078
8	2,6	700	2×0,52	120	АВ по команде БЗУ-ТП	637; (452)	0,104
9	2,6	750	2×0,52	120	Плавкий элемент	634; (450)	0,387
10	12,6	750	2×0,52	120	АВ по команде БЗУ-ТП и плавкий элемент	2043; (1449)	0,046
11	12,6	750	1×0,52	60	Плавкий элемент	1645; (1167)	0,041 ($\Delta t=0,027$ с)
12	12,6	501	1×0,52	60	Плавкий элемент	1240; (879)	0,022 ($\Delta t=0,016$ с)
13	24,0	501	1×0,52	60	Плавкий элемент	1786; (1267)	0,0086 ($\Delta t=0,0045$ с)

В табл. 1 параметр Δt – интервал времени между началом КЗ и зафиксированным моментом начала плавления плавкого элемента предохранителя. Нелинейная зависимость времени срабатывания плавкого элемента от соотношения величины тока в защищаемой цепи к току плавления ($\lambda=i_{к.з.}/i_{пл}$) в полной мере выявлена в ходе выполнения экспериментов (со-

поставление строк 1, 6, 9, 13 табл. 1) и позволяет утверждать, что с увеличением данного соотношения продолжительность срабатывания (перегорания) плавкого элемента будет значительно меньше, чем продолжительность реакции на КЗ МТЗ БЗУ-ТП и, тем более, последующего отключения автоматического выключателя.



а



б

Рис. 3: Ток в силовой цепи короткого замыкания:

- а – фиксация момента перегорания плавких элементов в цепи трехфазного КЗ на выходе автоматического выключателя за время, меньшее продолжительности реагирования на короткое замыкание БЗУ-ТП и расцепителей АВ;
- б – осциллограмма тока в цепи короткого замыкания, уставка БЗУ-ТП – 501 А; $U_n=25,5$ В; $S_{np}=3 \times 0,52$ мм², амплитуда тока 4292 А; срабатывание предохранителя без отключения автоматического выключателя – продолжительность процесса 0,0059 с

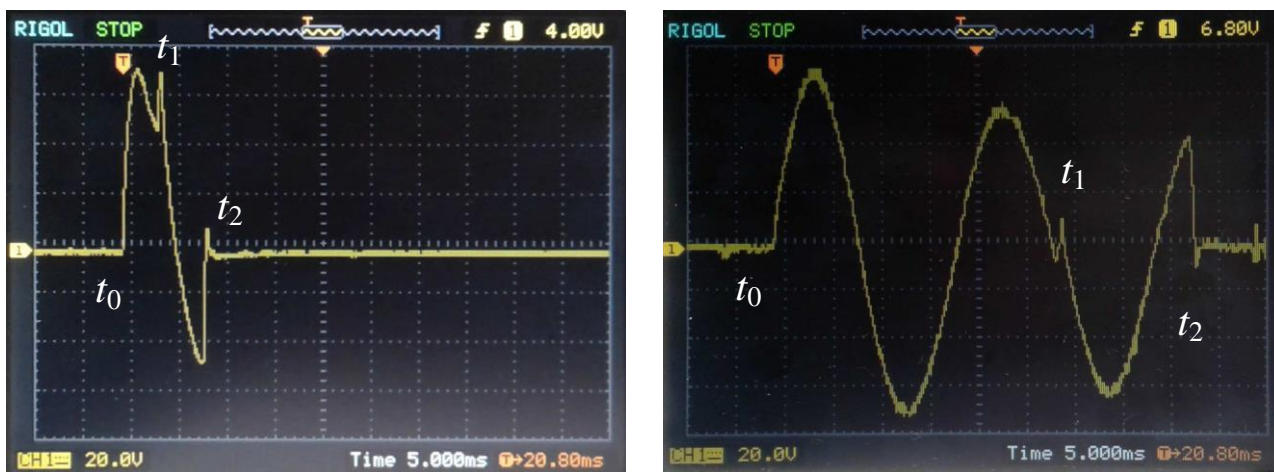


Рис. 4. Осциллограммы тока в цепи короткого замыкания:
 а – уставка БЗУ-ТП, 501 А; $U_{\pi}=24,0$ В; $S_{np}=1 \times 0,52 \text{ мм}^2$;
 б – уставка БЗУ-ТП, 750 А; $U_{\pi}=12,6$ В; $S_{np}=1 \times 0,52 \text{ мм}^2$;
 в обоих случаях срабатывание предохранителя без отключения АВ

Это подтверждается результатами, представленными в строках 6, 11...13 табл. 1 и на осциллограммах (рис. 3б, рис. 4а,б).

Выявленный эффект синхронного срабатывания плавкого элемента и штатной МТЗ подтверждает теоретическую возможность повышения коммутационного ресурса автоматического выключателя, при этом при высоких значениях λ срабатывание плавкого элемента опередит реакцию на ток КЗ со стороны максимальной токовой защиты БЗУ-ТП, что не приведет к отключению под нагрузкой автоматического выключателя, т. е. обеспечит полное сохранение его коммутационного ресурса. Указанные соображения должны быть учтены при выборе предохранителя в процессе практической (в условиях промышленности) реализации устройства энергетического ограничения в цепи отключения междуфазного тока в присоединении трансформаторной подстанции.

Фактором, ограничивающим параметр λ , в данном случае выступает показатель суммарного тока двигателей потребителей технологического участка, включая пусковой ток потребителя максимальной мощности. С увеличением мощности потребителей расчетный параметр λ должен быть уменьшен, что переведет продолжительность срабатывания плавких элементов во временной диапазон, сопоставимый с продолжительностью срабатывания штатных МТЗ (БЗУ-ТП) КТП. Однако положительный эффект применения данного технического решения очевиден, зафиксирована возможность 2...13-кратного сокращения продолжительности отключения КЗ в сравнении с быстродействием штатных устройств защитного отключения и ограничения энергетических показателей процесса.

С целью выявления возможности использования вакуумного контактора в качестве дополнительного устройства ускоренного автоматического разрыва цепи коммутации тока КЗ исследована схема, где в качестве вакуумного элемента КМ2 был применен контактор типа SPVC 1-630 с паспортными параметрами – максимальный ток: включения – 30 кА; отключения – 12 кА, время отключения 7 ± 2 мс (рис. 5).

Первоначально цепь отключения вакуумного контактора была связана с выходом максимальной токовой защиты БЗУ-ТП, что позволило выявить фактическую продолжительность отключения тока этим контактором, сопоставимую с параметрами быстродействия автоматического выключателя А3792У при его срабатывании по команде той же МТЗ БЗУ-ТП. Измеренные параметры представлены, в частности, на рис. 6.

Кроме того, в ходе экспериментов при коммутации цепи КЗ с током 722 А (действующее значение) был зафиксирован отказ вакуумного контактора SPVC 1-630, выразившийся в спекании между собой силовых контактов и их механическом отделении от перемещающегося якоря электромагнита. Таким образом, при управлении (включение/отключение) контактором его якорь электромагнита перемещался в штатном режиме, слаботочный блок-контакт также штатно переключался, в то время как рабочие (силовые) контакты постоянно оставались соединенными.

Это дает основания считать недостаточным уровень достоверности информации о состоянии силовых контактов вакуумного контактора, формируемой коммутацией его слаботочного блок-контакта. Это представляет практическую актуальность в контексте эксплуатации вакуумных контакторов.

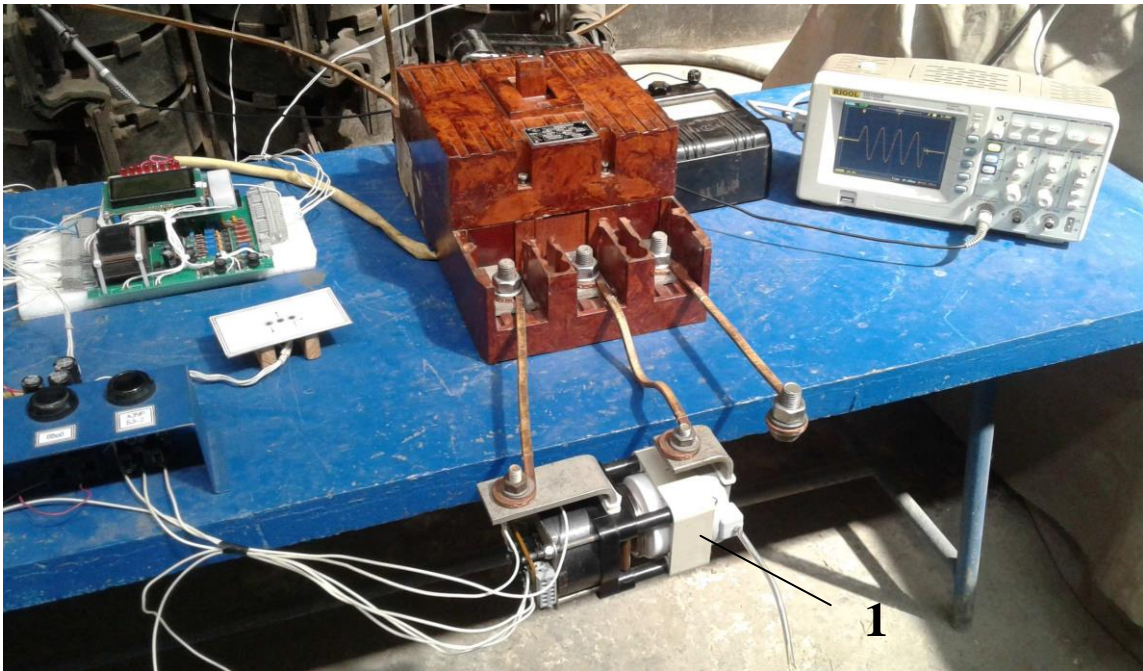


Рис. 5. Фиксация срабатывания внешней максимальной токовой защиты БЗУ-ТП с воздействием на независимый расцепитель АВ при исследовании функциональных свойств контактора типа SPVC 1-630 применительно к его использованию в качестве дополнительного коммутационного элемента отключения цепи короткого замыкания: 1 – контактор SPVC 1-630; БЗУ-ТП – 501 А; ток цепи КЗ, действующее значение, – 722 А



Рис. 6. Осциллограмма тока в цепи короткого замыкания при исследовании схемы стенда по рис. 5: уставка БЗУ-ТП – 501 А; $U_d=4,5$ В; $I_m=1018$ А, срабатывание автоматического выключателя А3792 по команде блока БЗУ-ТП, сопровождаемое «спеканием» силовых контактов вакуумного контактора SPVC1-630

Ввиду невыявления фактических параметров быстродействия устройства ограничения продолжительности КЗ, выполненного на основе применения однополюсного вакуумного контактора (функционирующего совместно с защитой БЗУ-ТП), превышающих скорость защитного отключения КЗ автоматическим вы-

ключателем А3792У (по команде этой же защиты), представляется целесообразным при разработке технических решений с использованием данного контактора использовать его паспортные технические характеристики и увязывать его работу с устройствами МТЗ более высокого быстродействия.

Выводы

Исследованиями установлена возможность ускоренного автоматического разъединения цепи короткого замыкания силового присоединения, отходящего от комплектной трансформаторной подстанции участка шахты, техническими средствами, разрывающими цепь соединения в «звезду». В устройства реализации данной функции может быть принят мостовой выпрямитель, подключенный входами к вторичным обмоткам трансформатора и нагруженный предохранителем. В этом случае установлена возможность срабатывания предохранителя (в случае возникновения КЗ) за время, существенно меньшее продолжительности срабатывания (выявления КЗ и отключения) штатных средств максимальной токовой защиты либо сопоставимое с данным параметром. Это подтверждает предположение о возможности ограничения энергетических показателей плазмо-, дугообразования в силовых контактных группах автоматического выключателя АЗ792У КТП, что обеспечивает существенное повышение его ресурса.

Использование вакуумного контактора (вместо предохранителя) в цепи нагрузки мостового выпрямителя также создает эффект дополнительного разрыва цепи КЗ, однако отличается инерционностью, обусловленной продолжительностью выявления КЗ устройством максимальной токовой защиты и собственным временем срабатывания. Кроме этого, в отношении эксплуатации вакуумного контактора установлена некорректность фиксации его состояния по положению слаботочного контакта (используемого в схемах управления и сигнализации), поскольку в результате возможного отката (в виде отделения якоря магнитопровода от силовых контактов в результате их спекания между собой) положение слаботочного контакта не будет соответствовать состоянию силовой контактной группы.

О.К. Marenich

Donetsk National Technical University (Donetsk)

Ye.V. Zolotaryov

Research, Project, Designing and Technological Institute of Explosion-Proof and Mining Electrical Equipment (Donetsk)

Список литературы

1. Berryann, R.J. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States [Electronic resource] / R.J. Berryann, J.A. Voelker // Mine Safety and Health Administration, Division of Electric Safety. – Triadelphia, West Virginia, 2005. – Mode of access: WWW.URL: www.msha.gov/s&hinfo/techrpt/electrical/lwcnt rl.pdf
2. Groh, H. Explosion protection: electrical apparatus and systems for chemical plants, oil and gas industry, coal mining / H. Groh. – Amsterdam; London: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 524 p.
3. Маренич, О.К. Элементы конструкции автоматического выключателя АЗ7ХХ как фактор возникновения его потенциально опасного состояния / О.К. Маренич, И.В. Ковалёва // Вестник ДонНТУ. – 2018. – №4. – С. 47-52.
4. Лелёвкин, В.М. Численное моделирование характеристик открытой диафрагмированной электрической дуги / В.М. Лелёвкин, В.Ф. Семёнов // Вестник КРСУ. – 2002. – №22. – С. 25-34.
5. Брон, О.Б. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов / О.Б. Брон, Л.К. Сушков. – Ленинград: Энергия, 1975. – 211 с.
6. Elkalashy, N.I. Modeling and Detection of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks. – Helsinki: Helsinki University of Technology, 2007. – 77 p.
7. Ковалёва, И.В. Техническая реализация токоограничения цепи короткого замыкания в контексте применения вакуумных коммутаторов / И.В. Ковалёва, О.К. Маренич // Вестник ДонНТУ. – 2018. – №1. – С. 34-40.
8. Блок защиты и управления трансформаторной подстанции БЗУ-ТП. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 2016. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://itep.com.ua/ru/catalogue/systems/bzu-tp/>

THE USE OF ADDITIONAL AUTOMATIC CIRCUIT BREAK FACILITIES FOR SHORT CIRCUIT CURRENT AS A MEANS OF IMPROVING THE CIRCUIT BREAKER RESOURCE OF A MINE TRANSFORMER SUBSTATION

Background. The АЗ792U circuit breaker is known as a reliable switching device used in the electrical complex of the mine section at a voltage of 660 V. It can also be used in a network with a voltage of 1140 V. However, there are cases when after switching off ultra-high short-circuit currents inside the circuit breaker there is an interphase conductivity which causes damage. The above

mentioned necessitates the development of a device to limit the current in the power circuit of the circuit breaker when switching off ultra-high short-circuit currents. Experimental studies of such a device are relevant.

Materials and/or methods. Developed the experimental rig and the empirical study carried out of the conceptual schemes which limit the energy performance of plasma formation in power contact groups of the A3792U circuit breaker of mine transformer substation when disabling phase-to-phase short circuits. The data on the operating parameters of devices that limit the duration of short circuits in the electrical network, which branches off from the transformer substation obtained. The corresponding waveforms and measurement results presented.

Results. Proved that the device for limiting the duration of the short circuit based on the use of a fuse has a speed sufficient to reduce the required thermal load of the power contact groups of the A3792U automatic switch of the transformer substation. The vacuum contactor used instead of a fuse creates the effect of an additional break of the short circuit but with a lower speed.

Conclusion. The assumptions about the possibility of increasing the life of the circuit breaker based on the use of additional high-speed devices limiting the duration of the short circuit current in the process of its protective shutdown are confirmed. The revealed operation parameters of the device for limiting short circuit duration, based on the use of a fuse for breaking the three-phase circuit of the transformer windings of the substation, give grounds for its use in industry.

Keywords: electrical complex, transformer substation, circuit breaker, short circuit, electric arc, resource, accelerated deenergizing, circuit, experimental studies, analysis.

Сведения об авторах

О.К. Маренич

SPIN-код: 3950-0577
 Телефон: +380 (71) 317-32-09
 Эл. почта: marenich13@gmail.com

Е.В. Золотарёв

Телефон: +380 (71) 412-10-54
 Эл. почта: transformator76@inbox.ru

Статья поступила 19.07.2019 г.
 © О.К. Маренич, Е.В. Золотарёв, 2019
 Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский

