

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

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТОКООГРАНИЧЕНИЯ ЦЕПИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В КОНТЕКСТЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ КОММУТАТОРОВ

На основании сопоставления различных схем токоограничения установлена приемлемость применения вакуумных контакторов коммутаторов в цепи соединения вторичных фазных обмоток трансформатора участковой подстанции в звезду. Использованы технические преимущества контактора SPVC, содержащего в своем составе катушку Роговского в качестве датчика тока. Предложена схема быстрого выявления процесса короткого замыкания и принудительного отключения вакуумных контакторов как средства обесточивания аварийного электрического присоединения в процессе отключения короткого замыкания. Сопоставление результатов моделирования процессов токоограничения, реализуемых различными схемами, показало эффективность и приемлемость применения контакторного коммутатора трехфазной обмотки питающего трансформатора в качестве исполнительного узла устройства токоограничения.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, короткое замыкание, защитное отключение, автоматический выключатель, токоограничение, электрическая схема, дроссель, вакуумный контактор, датчик тока, датчик короткого замыкания, ускоренное обесточивание, компьютерная модель, электрические параметры.

Постановка проблемы

Процесс короткого замыкания (КЗ) шахтной участковой электрической сети сопровождается крайне высокими токами, что приводит к значительным тепловым перегрузкам силовых контактных соединений автоматического выключателя в момент отключения аварийного процесса. Практика эксплуатации показала, что дугообразование в межконтактных промежутках при отключении токов короткого замыкания в сети линейного напряжения 1140 В сопровождается мощными ионизационными процессами, металлизацией изоляционных корпусов дугогасительных камер и, как следствие, провоцирует междуфазные короткие замыкания в самом автоматическом выключателе [1]. Поэтому задача ограничения тока сети в момент отключения КЗ является актуальной и требует исследований в области поиска и обоснования технических средств, обеспечивающих максимальное быстродействие данного процесса.

Анализ последних исследований и публикаций

Современные электрические сети шахтных участковых электротехнических комплексов отличаются разветвленностью кабельных линий. При этом применяются исключительно гибкие экранированные кабели, поскольку электромеха-

ническое оборудование данных комплексов является нестационарным. В результате, повреждения механически не защищенных гибких кабелей являются наиболее вероятными причинами аварийных и опасных состояний, в частности коротких замыканий. С учетом тенденции к повышению мощности электрооборудования речь идет о крайне высоких токах междуфазных замыканий, что предопределяет необходимость использования средств токоограничения применительно к аппаратуре защитного отключения [2]. Одним из решений в области быстродействующего ограничения тока короткого замыкания является применение коммутируемых индуктивностей в цепи защищаемого присоединения [3]. Схемно такое техническое решение представляется совокупностью встречнопараллельно включенных индуктивностей, одна из которых отключается симисторным коммутатором в момент исчезновения линейного напряжения в защищаемой сети. Исследования данной схемы [4] показали ее работоспособность, при этом в зависимости от установленной мощности потребителя (от 200 кВт до 800 кВт) падение напряжения на реакторе достигалось соответственно от 3,5 % до 13,7 %. Анализ быстродействия данной схемы требует отдельного исследования, учитываяющего инерционность индуктивных элементов. Однако данное устройство отли-

чается существенными габаритами, наличием трех силовых симисторов (требуется эффективная система их охлаждения). При этом габариты схемы (параметры дросселей) находятся в соотношении с мощностью нагрузки, что ограничивает применение дросселей для токоограничения в сетях с потребителями высокой мощности.

Безинерционностью и, следовательно, высокой скоростью срабатывания характеризуется токоограничитель, построенный по принципу разрыва цепи соединения «звезда» вторичных фазных обмоток трансформатора и реализованный предохранителем в качестве нагрузки выпрямительного моста [5]. Такая схема по своим габаритам не зависит от мощности нагрузки и может быть применена непосредственно в составе участковой трансформаторной подстанции. Однако остается проблемной задача охлаждения силового полупроводникового мостового выпрямителя в условиях его размещения в рудничном взрывобезопасном корпусе. Кроме этого, срабатывание плавкого предохранителя в момент возникновения короткого замыкания в мощной электросети линейного напряжения 1140 В будет сопровождаться значительным тепловыделением (перегорание плавкой вставки) и может спровоцировать взрыв метановоздушной смеси внутри оболочки трансформаторной подстанции, сопровождаемый возникновением значительного давления в ней. Так, известно, что при сгорании метано-воздушной смеси в замкнутом объеме без тепловых потерь давление внутри оболочки находится в пропорциональной зависимости от температуры в месте воспламенения элементов электрооборудования [6]. Поэтому применение плавкого предохранителя в качестве исполнительного элемента схемы токоограничения при отключении короткого замыкания создает потенциальную опасность взрыва метано-воздушной смеси внутри оболочки участковой трансформаторной подстанции и, как следствие, разрушения конструкции электрических элементов, размещенных в ней.

Цель (задачи) исследования

Рассмотренные проблемные вопросы предполагают поиск альтернативных технических решений при реализации общей идеи ускоренного разрыва схемы «звезда» вторичной трехфазной обмотки трансформатора подстанции в момент возникновения короткого замыкания. В частности, к необходимым и достаточным условиям реализации защитной функции следует отнести:

– соответствие коммутационной способности исполнительного устройства разрыва схемы

«звезда» реальным параметрам коммутируемого тока короткого замыкания;

– непревышение продолжительностью срабатывания исполнительного устройства величины времени разрыва силовой цепи контактами автоматического выключателя участковой трансформаторной подстанции;

– недопущение открытого дуго-, искрообразования в силовой цепи исполнительного устройства в процессе разрыва схемы «звезда» трансформатора при реагировании на процесс короткого замыкания в его силовом присоединении.

Очевидно, что перечисленные условия в своей совокупности представляют собой техническое противоречие, решение которого требует разработки схемы принудительного ускоренного отключения силового устройства бездуговой коммутации, что и является целью настоящей работы.

Основной материал исследования

Обзор известных схем токоограничения защитного отключения короткого замыкания (рис. 1, 2) выявил их недостаточную функциональность. Однако схема, реализующая разрыв звезды вторичных обмоток трансформатора участковой подстанции (рис. 2), создает приемлемые электроэнергетические условия последующего отключения аварийного присоединения контактами автоматического выключателя. Приемлемо рассмотренную функцию следует взять за основу, исключив при этом из схемы полупроводниковый силовой выпрямитель и плавкий предохранитель в качестве его нагрузки. В этом случае звезда вторичных обмоток трансформатора может быть разорвана отключением двух контакторов, расположенных между началами трехфазных вторичных обмоток трансформатора подстанции. Обзор технических средств в области силовой коммутации мощных присоединений [7,8] позволил сделать вывод о принципиальной возможности использования однополюсных вакуумных контакторов типа SPVC отечественного производства в сетях линейного напряжения 660 В и 1140 В [9].

Техническая характеристика данного контактора определяет величину максимального коммутируемого тока в 30 кА и время размыкания контактов 7 ± 2 мс. Указанные параметры согласуются с величинами аварийных токов шахтных участковых электросетей высокой мощности и сопоставимы с параметрами быстродействия современных микропроцессорных устройств максимальной токовой защиты [10,11]. Преимуществом данного технического решения

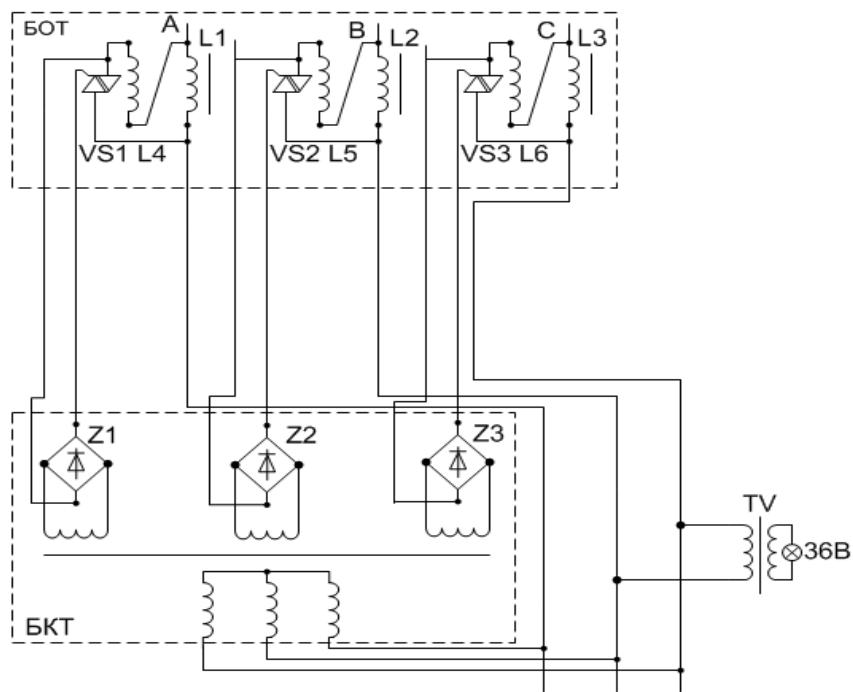


Рис. 1. Схема дроссельного ограничения тока короткого замыкания

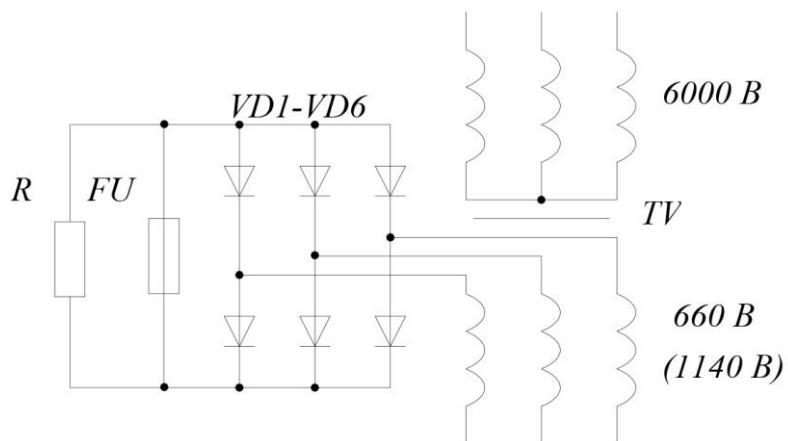


Рис. 2. Трехфазный трансформатор напряжения с устройством токоограничения при защитном отключении

является то, что процесс разрыва аварийной силовой цепи будет происходить в вакуумной камере и не провоцировать взрыв метановоздушной смеси внутри рудничной оболочки трансформатора.

Заявленный параметр быстродействия схемы определяется тем, что отключение (обеспечивание) катушки контактора происходит не вследствие ее контактной коммутации, а в результате встречного разряда предварительно заряженного конденсатора С2 (рис. 3б). Коммутация самого конденсатора может быть выполнена быстродействующей полупроводниковой схемой устройства максимальной токовой защиты, связанного непосредственно с датчиком тока L (рис. 3а), встроенным непосредственно в корпус контактора.

Это тем более уместно, поскольку конструкция самого контактора SPVC 1-630 позволяет реализовать функцию ускоренного выявления процесса короткого замыкания в защищаемой сети. Данный эффект достигается за счет применения в составе указанного контактора катушки Роговского в качестве датчика тока. Известно, что катушка Роговского, будучи надетой на шину токопровода, формирует на выходе напряжение, величина которого пропорциональна скорости нарастания тока в указанной шине:

$$u(t) = \left(\frac{L}{N} \right) \frac{di(t)}{dt},$$

где L – индуктивность катушки; N – количество витков катушки.

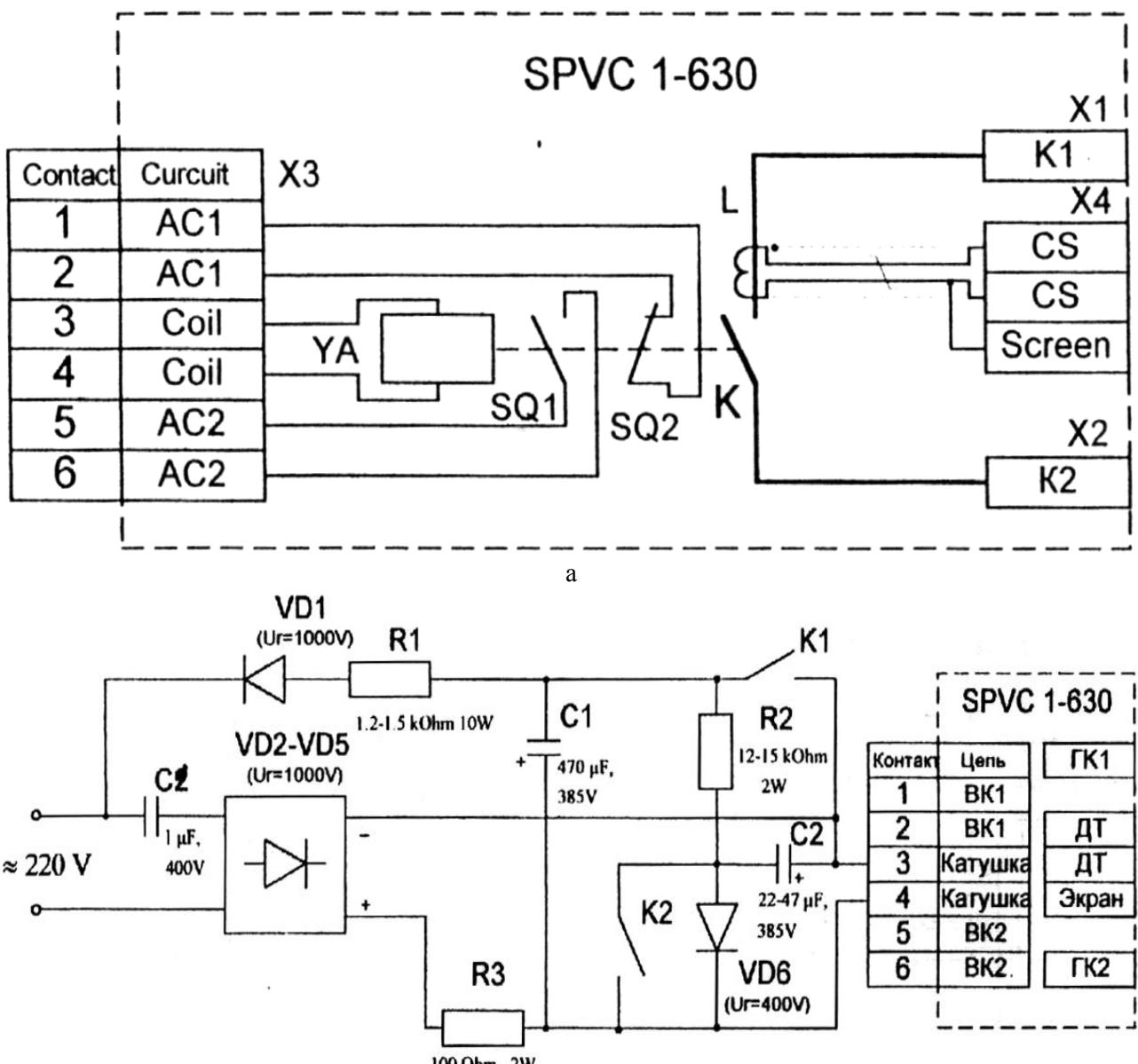


Рис. 3. Схема контактора SPVC 1-630 (а) и вариант им управления (б)

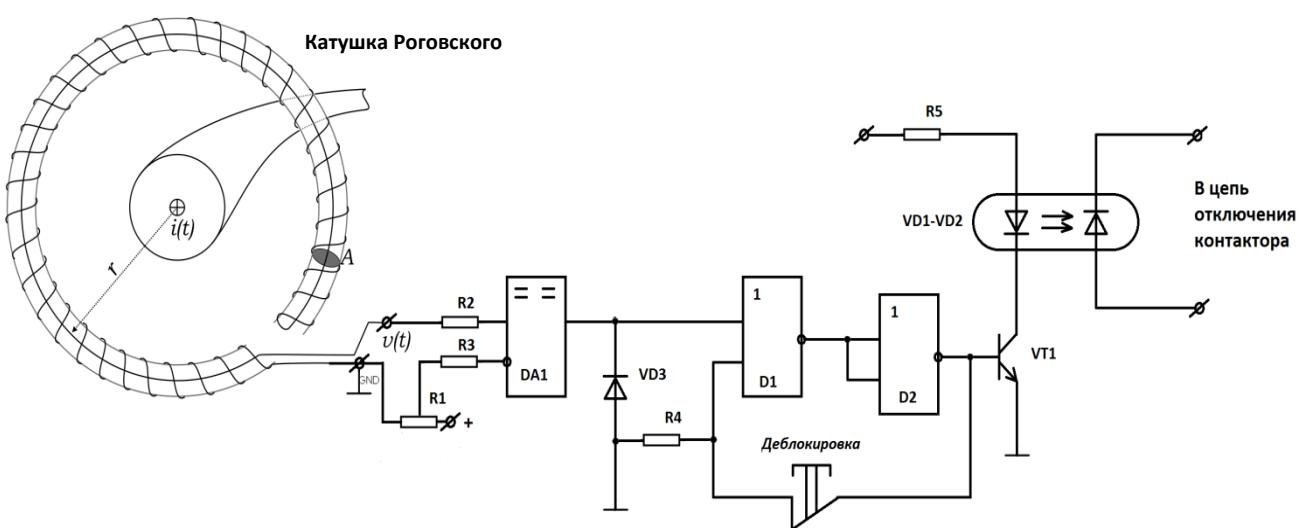


Рис. 4. Схема датчика короткого замыкания

Это позволяет построить схему устройства выявления короткого замыкания на базе компаратора DA1 (рис. 4), сопоставляющего величину импульса напряжения на выходе катушки Роговского с установкой, формируемой потенциометром R1. Кратковременный импульс, снимаемый с выхода компаратора DA1, запоминается как сигнал о коротком замыкании триггерной схемой на элементах «ИЛИ» D1 и D2, что в дальнейшем отрабатывается отпиранием ключевого транзистора VT1 и срабатыванием оптрана VD1-VD2.

Учитывая конфигурацию схемы управления контактором (рис. 4), фотодиод оптрана VD2 следует подключить параллельно кнопке «Стоп» K2 в цепь разряда коммутационного конденсатора. Таким образом обеспечивается мгновенная реакция схемы на процесс короткого замыкания.

Представляется рациональным сопоставить технические возможности данной схемы токоограничения и схемы индуктивного ограничителя тока [3]. Компьютерные модели данных схем представлены на рис. 5. При моделировании введены допущения, что активное и индуктивное

сопротивления источника питания соответствуют параметрам трансформатора подстанции ТСВП-1000-6/1.2; отходящий кабель марки ЭВБВ 3х95 длиной 200 м; точка короткого замыкания находится в 10 м от трансформаторной подстанции; сопротивление нагрузки соответствует активным и индуктивным параметрам двигателя мощностью 250 кВт. При этом учитывается время срабатывания защиты типа БКС-3МК – 5 мс, задержка на отключение встречной индуктивности в цепи токоограничения – 10 мс. Кроме этого, вводится допущение, что в течение 20 мс с момента возникновения короткого замыкания силовая цепь аварийного присоединения остается не разомкнутой силовыми контактами автоматического выключателя трансформаторной подстанции.

Сопоставление диаграмм фазных токов (рис. 6) подтверждает наличие инерционности схемы дроссельного токоограничения, наличие тока высокой величины в сети аварийного присоединения после его срабатывания. При этом выявленные недостатки отсутствуют в схеме токоограничения на основе контакторной коммутации

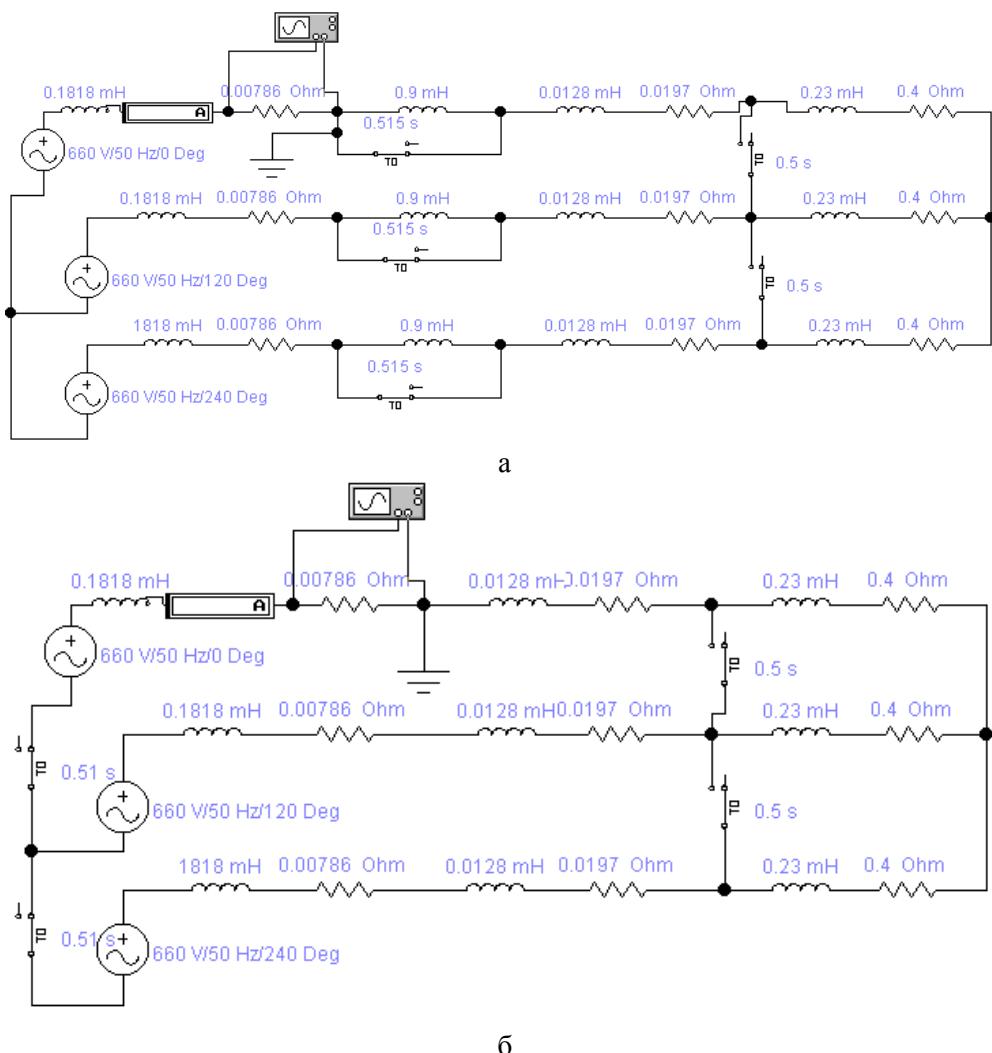


Рис. 5. Компьютерные модели схем с токоограничителями: *а* – по рис. 1; *б* – по рис. 2

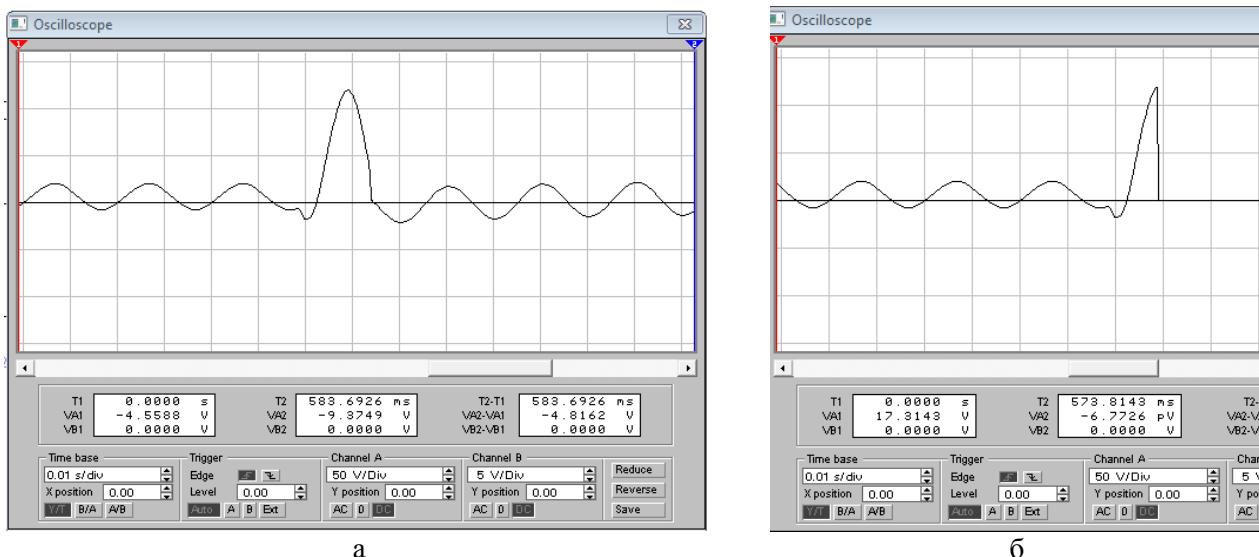


Рис. 6. Диаграммы моделирования формы токов вторичной фазной обмотки трансформатора подстанции ТСВП-1000-6/1,2, снятые с шунта фазной шины при способах токоограничения: *а* – дросельном; *б* – контакторном. Допущения – сечение жилы отходящего кабеля – 95 мм^2 , точка КЗ в 10 м от выхода подстанции

звезды трехфазной обмотки трансформатора подстанции. Так, продолжительность существования аварийного режима будет сопоставима с соответствующим времененным параметром при применении дросельного токоограничителя. Однако после срабатывания контакторного узла разъединения трехфазной схемы вторичной обмотки трансформатора питания электрической сети в ней полностью прекращается электрический ток, что существенно снижает тепловую нагрузку в силовых контактных соединениях автоматического выключателя трансформаторной подстанции.

Выводы

Установлена принципиальная возможность применения вакуумных контакторов, в частности, серии SPVC для реализации функции ограничения тока короткого замыкания в процессе отключения аварийного режима в шахтной участковой электрической сети высокой мощности линейного напряжения 1140 В. Установлены преимущества данного технического решения в сравнении с известными прототипами и возможность ограничения тока на уровне, недостаточном для повлечения тепловой перегрузки силовых контактов автоматического выключателя трансформаторной подстанции. Направлением дальнейших исследований следует считать экспериментальную проверку технических характеристик предложенной схемы.

Список литературы

- Смирнова, Н.В. Управление процессом горения электрической дуги на нелинейных участках её вольт-амперной характеристики с использова-

нием массива прецедентов / Н.В. Смирнова, В.В. Смирнов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Зб. наук. праць. КірДТУ. – Вип. 43, ч. II. – Кіровоград: КірДТУ, 2013. – С. 271-274.

- Маренич, К.М. Властивості силового електроустаткування технологічної дільниці в контексті створення експлуатаційних небезпек / К.М. Маренич // Холодильна техніка і технологія. – № 1 (141). – 2013. – С. 80-84.
- Авт. свид. 913516 СССР, МПК Н02Н09/02. Токоограничивающее устройство / В.А. Машкин, Л.С. Беспалов, В.Г. Савельев (СССР). – № 3000759/24-07; заявл. 25.07.1980; опубл. 15.03.1982. Бюл. № 10.
- Жуйков, П.К. Об ограничении токов короткого замыкания в цепях электроснабжения / П.К. Жуйков // Материалы международной конференции «Форум гірників», 11-13 октября 2007, Днепропетровск. – Днепропетровск: НГУ, 2007. – С. 203-206.
- Патент на изобретение 102285 (UA), МПК (2013.01) Н02Н 3/00. Трифазный трансформатор напруги / К.М. Маренич, І.В. Ковальова, О.К. Маренич. – а 2011 09048; заявл. 19.07.2011; опубл 25.06.2013. Бюл. № 12.
- Переходные процессы в системах электроснабжения: учебник [для студентов высших учебных заведений] / Г.Г. Пивняк [и др.]; под ред. академика НАН Украины Пивняка Г.Г. – [3-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат; Днепропетровск: НГУ, 2003. – 548 с.
- 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: https://pdfs.semanticscholar.org/6827/53887a0b319296f716beb11b9f01273115a1.pdf?_ga=2.1670840.803898779.1508794395-959523617.1508794395
8. Saccomanno, F. Electric Power Systems: Analysis and Control / F. Saccomanno. – Wiley-IEEE Press, 2003. – 744 p.
 9. Контактор однофазный вакуумный серии SPVC. Техническое описание: Контактор серии SPVC, завод «Таврида», Севастополь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.masters.donntu.org/2008/fema/tarasenko/library/5.htm>
 10. Groh, H. Explosion protection: electrical apparatus and systems for chemical plants, oil and gas industry, coal mining / Heinrich Groh. – Amsterdam; London: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 524 p.
 11. Техническая характеристика блока токовой защиты БКЗ-3МК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://itep.com.ua/ru/catalogue/defence/bkz-3_mk.

I.V. Kovaleva /Cand.Sci. (Eng.)/, O.K. Marenich
Donetsk National Technical University (Donetsk)

TECHNICAL IMPLEMENTATION OF CURRENT LIMITING IN SHORT CIRCUITS IN THE CONTEXT OF VACUUM SWITCHES APPLICATION

Background. Determined the relevance of application of current limiters providing the efficiency of auto switch series AB 37XX for the mine transformer substation in the line voltage 1140 V network with consumers of high rated power. On the basis of comparison of various schemes of current limiting of the short circuit of mine electric network, the factors limiting the use of choke schemes and safety fuses as a switching of «star» scheme of the secondary winding of the transformer of mine substation revealed. Based on the analysis of the technical characteristics of the switching devices of power circuits, the acceptability of the use of vacuum contactors in the circuit of star connection of the secondary phase windings of substation transformers established.

Materials and/or methods. The technical advantages of SPVC contactor used, and the principal possibilities of the accelerated shutoff through the creation of the countercurrent due to the discharge of the switching capacitor considered. Taken into account the benefits associated with the presence in the structure of SPVC contactor of a current sensor – Rogowski coil, the voltage pulse generator with an amplitude proportional to the derivative of current over time.

Results. The scheme of the device for fast detection of short-circuit process on the basis of analog comparator, trigger cell and an optoelectronic actuator for switching the capacitor of the contactor forced shutoff proposed. Acceptable time characteristics established of a short circuit de-energization for the time not exceeding the disconnection period of the power contact group of the main circuit breaker of mine transformer substation in the process of protective shutoff of the short circuit in the power connection. Modeling of the short circuit current limiting processes implemented in relation to the parameters of a real electrotechnical complex with the use of a transformer substation of 1000 kVA capacity and an outgoing connection cable with a cross-section of the working core of 95 sq. mm, taking into account the distance to the short-circuit point in the range of 10 m to 200 m.

Conclusion. Comparison of the results of simulation of current limiting processes realized by different circuits confirmed the limited functionality of the choke current limiter and showed the efficiency and acceptability of using the contactor switch of the three-phase winding of the supply transformer as the working unit of the current limiter.

Keywords: electrotechnical complex, short circuit, protective shutoff, circuit breaker, current limiting, electrical circuit, choke coil, vacuum contactor, current sensor, short circuit sensor, accelerated shutoff, computer model, electrical parameters.

Сведения об авторах

И.В. Ковалева

Телефон: +380 (71) 334-91-00
Эл. почта: visara@mail.ru

О.К. Маренич

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

Статья поступила 26.02.2018 г.

© И.В. Ковалева, О.К. Маренич, 2018
Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный