

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

## **ТОКООГРАНИЧЕНИЕ ЦЕПИ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ КАК ИННОВАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ**

*На основании исследования модели коммутационного переходного процесса в силовой цепи шахтной участковой трансформаторной подстанции установлены параметры токоограничения при отключении междуфазного короткого замыкания в отходящем присоединении при условии применения полупроводниково-резистивного устройства коммутации трехфазной цепи вторичных обмоток трансформатора.*

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

### **Постановка проблемы**

Междужафазные короткие замыкания (КЗ) в промышленных электросетях переменного тока представляют наивысшую опасность воспламенения электрооборудования. В еще большей степени опасность проявляется при эксплуатации шахтных участковых электросетей, поскольку в условиях шахты постоянно присутствует фактор вероятного взрыва метановоздушной смеси. В этой связи в составе схем силовых коммутационных аппаратов применяют устройства максимальной токовой защиты как непосредственного (максимальные расцепители), так и пропорционального (полупроводниковые устройства максимальной токовой защиты) измерения тока защищаемого силового присоединения. В качестве исполнительного коммутационного устройства в этом случае выступает автоматический выключатель комплектной участковой трансформаторной подстанции, а также аналогичный групповой автоматический выключатель распределительного пункта участка.

Современная тенденция повышения мощности электромеханических установок технологического участка шахты неизбежно ведет к необходимости перехода на более высокие уровни номинального напряжения электропитания. С учетом реализации переключения отечественных промышленных электросетей со схемы «звезда» на схему «треугольник» (и наоборот) речь идет о применении для электропитания технологических участков шахт как линейного напряжения 660 В (фазное – 380 В), так и линейного напряжения 1140 В (фазное – 660 В). Особенность та-

кого технического решения состоит в том, что напряжение 1140 В, формально относящееся к классу высоких напряжений, лишь ненамного превышает минимальный уровень напряжений этого класса (1000 В).

Экономически обоснованным решением стало применение в шахтных электрических сетях линейного напряжения 1140 В низковольтного автоматического выключателя A37XX при условии его адаптации (аппарат типа A3792У). Однако практикой его эксплуатации выявлены повторяющиеся эффекты электродугового повреждения его силовых коммутационных элементов (междужафазный пробой) в процессе подачи напряжения на отходящее присоединение при условии, что предшествующим был процесс защитного отключения междуфазного короткого замыкания.

В этом случае имеет место не только невосстановливаемое повреждение автоматического выключателя, но и общее снижение ресурса шахтной участковой трансформаторной подстанции.

Этим определяется целесообразность поиска технических решений в области автоматического ограничения энергетических параметров в процессе отключения короткого замыкания в присоединении трансформаторной подстанции и обосновании их приемлемых эксплуатационных характеристик.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

На основании исследования конструкции автоматического выключателя A3792У, выпол-

нявшего многократные отключения токовой перегрузки в сети линейного напряжения 1140 В, выявлены ее элементы, способствующие созданию омеднения поверхности диэлектриков в результате воздействия плазменно-ионизационных процессов, обусловленных коммутационной дугой высокой мощности [1]. Соответствующие мощностные показатели дугообразования относятся к случаю отключения автоматическим выключателем междуфазного короткого замыкания, образовавшегося в непосредственной близости от выходных силовых контактов трансформатора шахтной участковой подстанции высокой мощности (630 кВА и более) при величине линейного напряжения сети 1140 В.

Процесс КЗ в известных исследованиях представлен как результат действия совокупности встречно направленных энергетических потоков со стороны питающей трансформаторной подстанции и асинхронных двигателей потребителей [2,3]. При этом детально рассмотрены свойства этого процесса как переходного. Технические средства максимальной токовой защиты представлены разработками, действие которых основано на сравнении тока защищаемой сети или пропорционального параметра с параметром уставки срабатывания. Однако действие токовой защиты не сопровождается токоограничением сети и отличается наличием временной задержки, связанной с длительностью выявления аварийного процесса и длительностью разъединения силовой группы контактов исполнительного коммутационного аппарата.

Исследования в области теории электрической дуги [4] подтверждают, что ее энергетика определяется как величиной электрического тока в канале дугообразования (в данном случае – в области разъединения контактов автоматического выключателя), так и продолжительностью процесса дугообразования. Таким образом, научную и практическую актуальность представляют исследования процессов токоограничения цепи отключения тока короткого замыкания на основе применения дополнительного узла

ускоренной коммутации вторичных обмоток трансформатора участковой подстанции. В частности, такой узел может быть создан на основе применения плавких предохранителей.

### Цель (задачи) исследования

Целью исследования является установление обоснованности допущения о корректности применения дополнительного устройства ускоренного разъединения трехфазной схемы вторичной обмотки трансформатора участковой подстанции, функционирующего на основе эффекта плавкого предохранителя, в контексте решения задачи повышения ресурса подстанции и ее силовых коммутационных компонентов.

Для достижения этой цели должна быть решена задача обоснования структуры токоограничивающего устройства и исследования модели процесса токоограничения коммутации цепи короткого замыкания.

### Основной материал исследования

Характер протекания переходных процессов в силовом присоединении участковой трансформаторной подстанции при возникновении короткого замыкания на ее выходе или в кабеле на близком расстоянии от выхода может быть установлен исследованием расчетной схемы (рис. 1), содержащей одно силовое присоединение.

Параметрами и компонентами схемы являются:  $e_A$ ,  $e_B$ ,  $e_C$  – мгновенные значения фазного напряжения на выходе трансформаторной подстанции;  $R_{mp}$ ,  $L_{mp}$  – активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки трансформатора;  $AB$  – автоматический выключатель;  $KM$  – контактор магнитного пускателя;  $R_{k1}$ ,  $L_{k1}$  – активное сопротивление и индуктивность первого условного участка гибкого кабеля;  $R_{k2}$ ,  $L_{k2}$  – то же для второго условного участка гибкого кабеля;  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  – мгновенные значения токов сети;  $R_s$ ,  $L_{sl}$  – сопротивления асинхронного двигателя (АД) потребителя, представленные соответственно активным сопротивлением и индуктивностью статора.

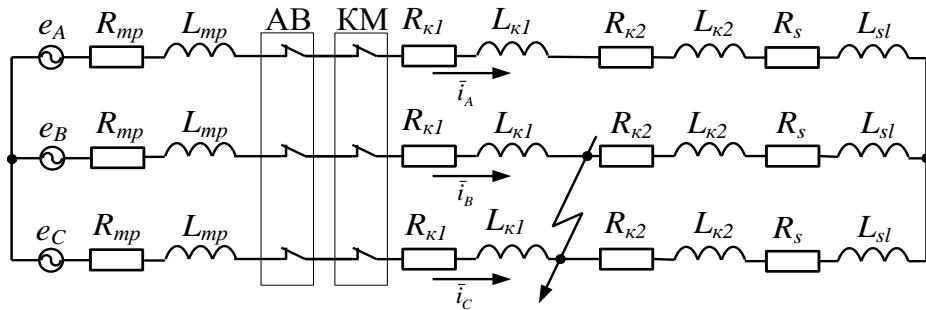


Рис. 1. Схема исследования короткого замыкания на выходе трансформаторной подстанции

В силу незначительной длины магистрального кабеля его параметрами пренебрегаем.

В процессе исследований представляется корректным ввести следующие допущения:

- короткое замыкание возникает в гибком кабеле, присоединенном к выходу трансформаторной подстанции в диапазоне расстояний от нуля до половины длины кабеля;
- защитное отключение сети выполняется автоматическим выключателем через 0,1 с после возникновения аварийного состояния;
- в качестве аварийного состояния принимаем наиболее распространенный режим двухфазного короткого замыкания;
- исследование производится в отношении шахтной участковой электрической сети номинального линейного напряжения 660 В; 1140 В частоты 50 Гц;
- в исследуемой шахтной участковой электросети могут быть задействованы комплектные трансформаторные подстанции серии КТПВ мощностью 400 кВА, 630 кВА и 1000 кВА; гибкий экранированный кабель марки КГЭШ длиной 200 м и сечением силовых жил 70 мм<sup>2</sup>, что относится к наиболее распространенным техническим решениям в области электроснабжения горных технологических машин высокой мощности.

Дифференциальное уравнение, описывающее процессы в исследуемой схеме, представлено выражением:

$$\bar{u} = (R_{tr} + R_{SA} + R_{MK}) \bar{i}_{\Sigma} + (L_{tr} + L_{MK}) \frac{d\bar{i}_{\Sigma}}{dt} + \bar{u}_1. \quad (1)$$

Учитывая, что на выходе трансформатора участковой подстанции формируется симметричное трехфазное напряжение прямой последовательности и постоянной частоты, пространственный вектор напряжения  $\bar{u}$  определяется выражениями:

$$\bar{u} = u_{\alpha} + j u_{\beta}, \quad (2)$$

$$u_{\alpha} = U_m \cos(\omega t), \quad u_{\beta} = U_m \sin(\omega t), \quad (3)$$

где  $U_m$  – действующее значение фазной ЭДС, которая индуцируется во вторичной обмотке трансформатора подстанции.

Выражения (1)...(3) представляют собой математическую модель общей части сети, включающей трансформаторную подстанцию с автоматическим выключателем  $SA$  на выходе распределительного устройства низкого напряжения (подстанции) и магистральный кабель (рис. 2).

Результаты моделирования для отдельных параметров исследуемого объекта в состоянии двухфазного короткого замыкания в отходящем кабеле (рис. 3) характеризуют количественные показатели процесса, в частности, величину тока силового присоединения на выходе трансформатора подстанции.

Полученные величины соответствуют уровню, достаточному для активизации процессов плавления, кипения поверхностей силовых контактов автоматического выключателя при разъединении цепи КЗ, насыщении плазмы дуги параметрами металла (контактов) и образования расширяющихся областей потоков газа в пред- и наддиафрагменными областями распространения тела дуги (рис. 4) [4].

Принципиально важно учитывать, что процесс двухфазного короткого замыкания в дальнейшем переходит в последующую фазу трехфазного замыкания, что еще больше повышает величины токов короткого замыкания и в еще большей степени обуславливает актуальность защитного токоограничения процесса отключения аварийного присоединения. В настоящее время задача ограничения тока КЗ в шахтных низковольтных сетях не решена, т.к. применение токоограничивающих реакторов ограничивается их значительными габаритами и снижением качества напряжения.

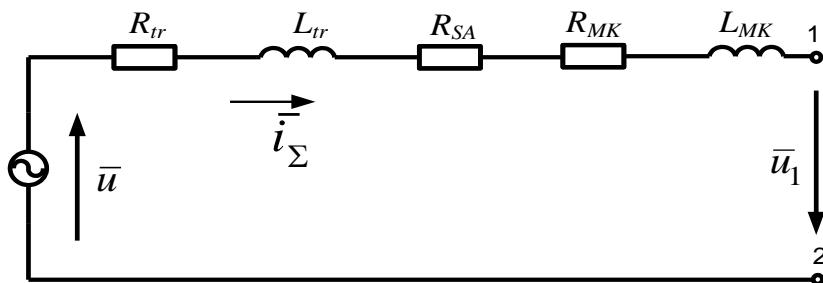


Рис. 2. Схема замещения общей части сети – трансформаторной подстанции с автоматическим выключателем  $SA$ , на выходе распределительного устройства низкого напряжения, и магистрального кабеля

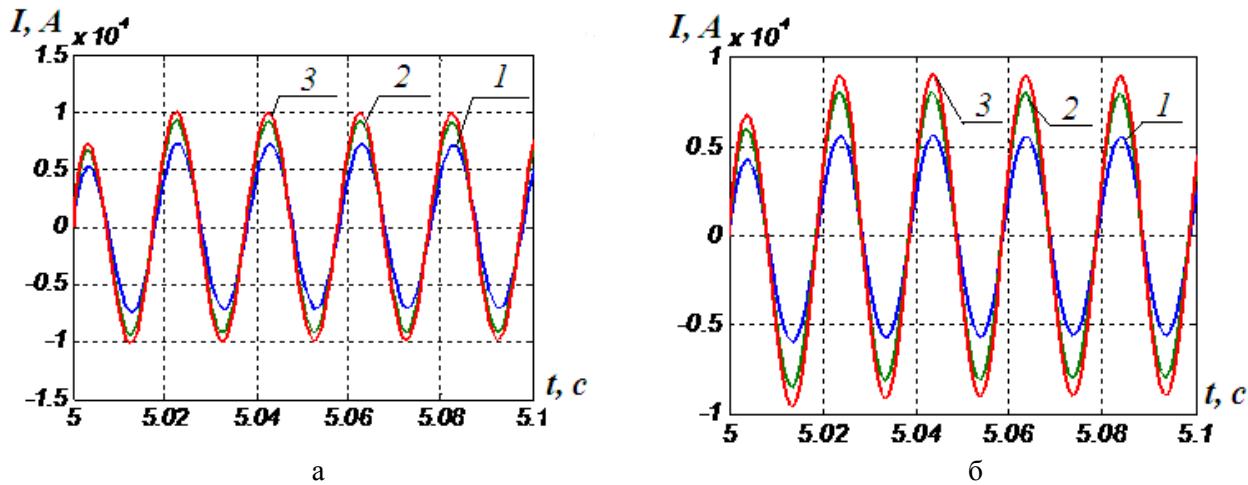


Рис. 3. Диаграммы величин тока двухфазного короткого замыкания:  
а – в сети 660 В; б – в сети 1140 В; 1 – КТПВ-400; 2 – КТПВ-630; 3 – КТПВ-1000

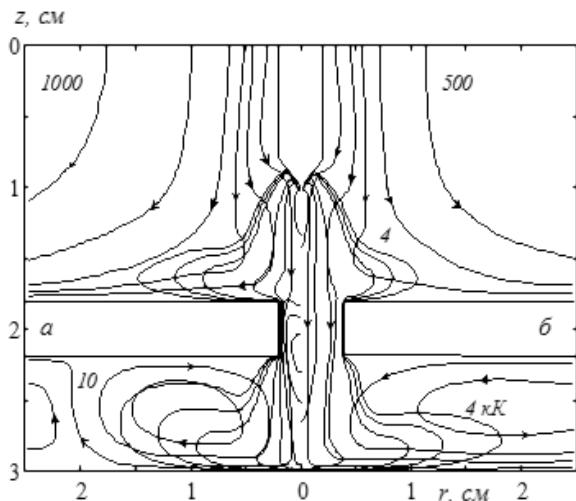


Диаграмма 1

Рис. 4. Распределение линий тока газа,  $G=1, 10, 50, 100, 200, 500, 1000 \text{ мг/с}$ , и поля изотерм, жирные линии  $T=4, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35 \text{ кК}$ , в дуге  $I=200 \text{ А}$  в зависимости от диаметра диафрагмы: диаграмма 1а –  $d=4$ ; 1б –  $d=8$ ; распределение линий тока газа,  $G=1, 10, 50, 100, 500 \text{ мг/с}$ , поля изотерм, жирные линии  $T=4, 7, 10, 15, 20 \text{ кК}$ , и линий электрического тока с шагом 0,1 в дуге с плоским торцом катода,  $I=200 \text{ А}$ : диаграмма 2 –  $d=4$

Простейшим методом ограничения энергетики коммутационного дугообразования является разрыв коммутируемой цепи дополнительным коммутационным устройством ускоренного быстродействия. В качестве технического решения в данном случае представляется приемлемым использовать плавкий предохранитель FU в качестве обобщенной нагрузки силового выпрямителя VD1...VD6, объединяющего в схему «звезда» обмотки трех фаз вторичной цепи трансформатора TV подстанции участка шахты (рис. 5) [5].

Такое применение предохранителя в трехфазной промышленной электросети (предназначенной для питания асинхронных двигателей) допустимо, поскольку предохранитель воздействует одновременно на все фазы и не провоци-

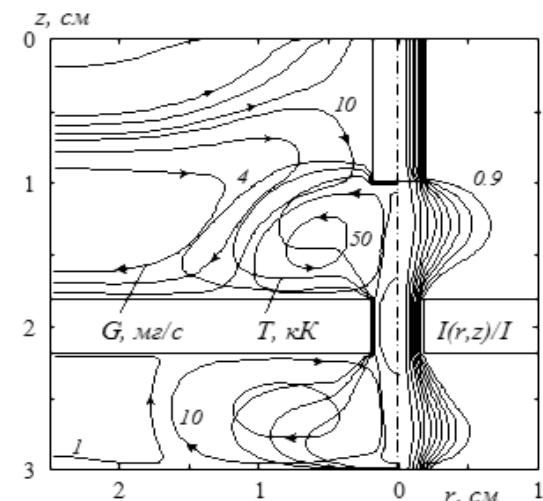


Диаграмма 2

рут возникновение неполнофазного режима после защитного срабатывания. В электротехнических комплексах повышенной мощности в этом случае могут применяться комплекты параллельно соединенных предохранителей [6].

Действие предлагаемого технического решения заключается в автоматическом увеличении сопротивления схемы соединения в трехфазную систему фаз вторичных обмоток трансформатора трансформаторной подстанции электросети шахтного участка за счет срабатывания плавкого предохранителя FU в момент возникновения повышенного тока в контуре выпрямителя VD1...VD6. Сопротивление резистора в этом случае может равняться  $R=10 \Omega \div \infty$ . Это позволяет выполнить токоограничение в сети при сниженных показателях искрообразования и перенапряжения.

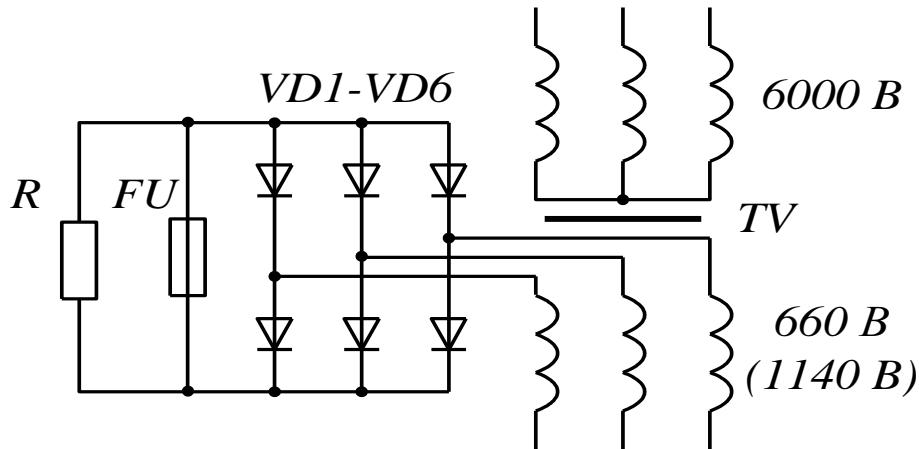


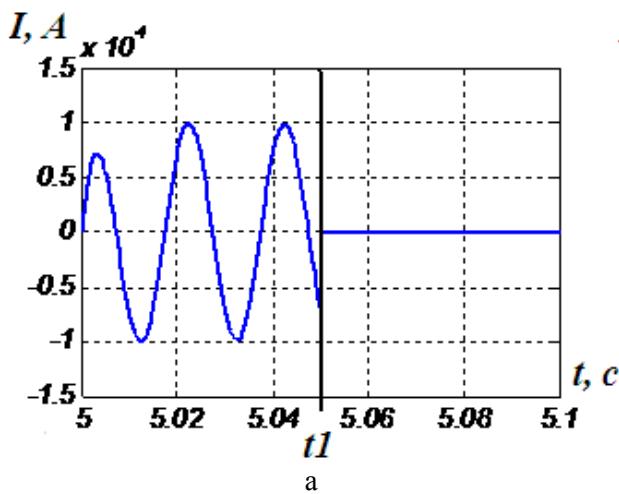
Рис. 5. Трехфазный трансформатор напряжения с устройством токоограничения цепи защитного отключения

Кроме этого, защитное действие схемы (см. рис. 5) предполагает срабатывание нулевого расцепителя автоматического выключателя трансформаторной подстанции, что повышает надежность защиты.

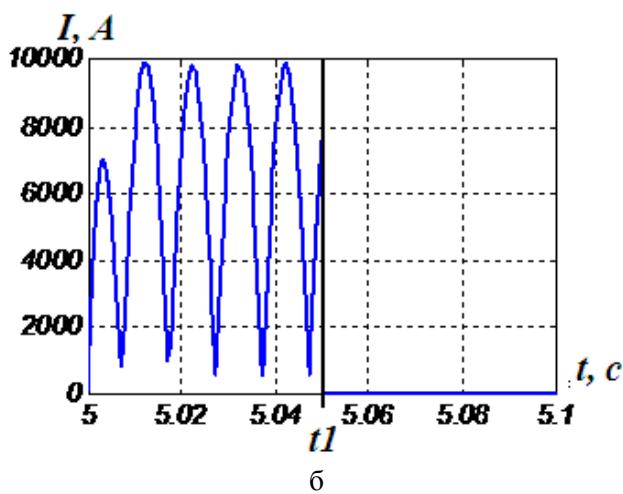
С целью исследования токоограничивающего эффекта, который обеспечивается предлагаемым техническим решением (см. рис. 5), дополним модель элементами токоограничения и введем допущение, что время срабатывания плавкого предохранителя с учетом величин токов короткого замыкания (см. рис. 3) не превышает 0,05 с. Результаты моделирования представлены на рис. 6, где индексом  $t_1$  обозначены моменты срабатывания плавкого предохранителя.

Результатами исследования установлен токоограничивающий эффект, сопровождающий действие предлагаемого устройства при возникновении короткого замыкания (см. рис. 6а). Однако в момент срабатывания плавкого предохранителя возникают значительные пере-

напряжения в элементах электрооборудования, поэтому с целью предупреждения такого негативного эффекта параллельно плавкому предохранителю целесообразно подключить дополнительный резистор. Результаты моделирования с момента срабатывания плавкого предохранителя с учетом дополнительного резистора  $R=50$  Ом представлены на рис. 7 и свидетельствуют о наличии эффекта снижения энергетических показателей процесса отключения цепи короткого замыкания автоматическим выключателем шахтной участковой трансформаторной подстанции. Это подтверждает целесообразность применения автоматического токоограничивающего устройства цепи отключения аварийного тока в качестве технического решения в контексте повышения ресурса подстанции и, в частности, силовых коммутационных элементов ее функционального узла – автоматического выключателя распределительного устройства низкого напряжения.



а



б

Рис. 6. Диаграммы величины тока двухфазного короткого замыкания в сети 660 В, КТПВ-1000:  
а – с учетом токоограничивающего эффекта плавкого предохранителя;  
б – величины тока на выходе выпрямителя  $VD1-VD6$ ,  $R=\infty$

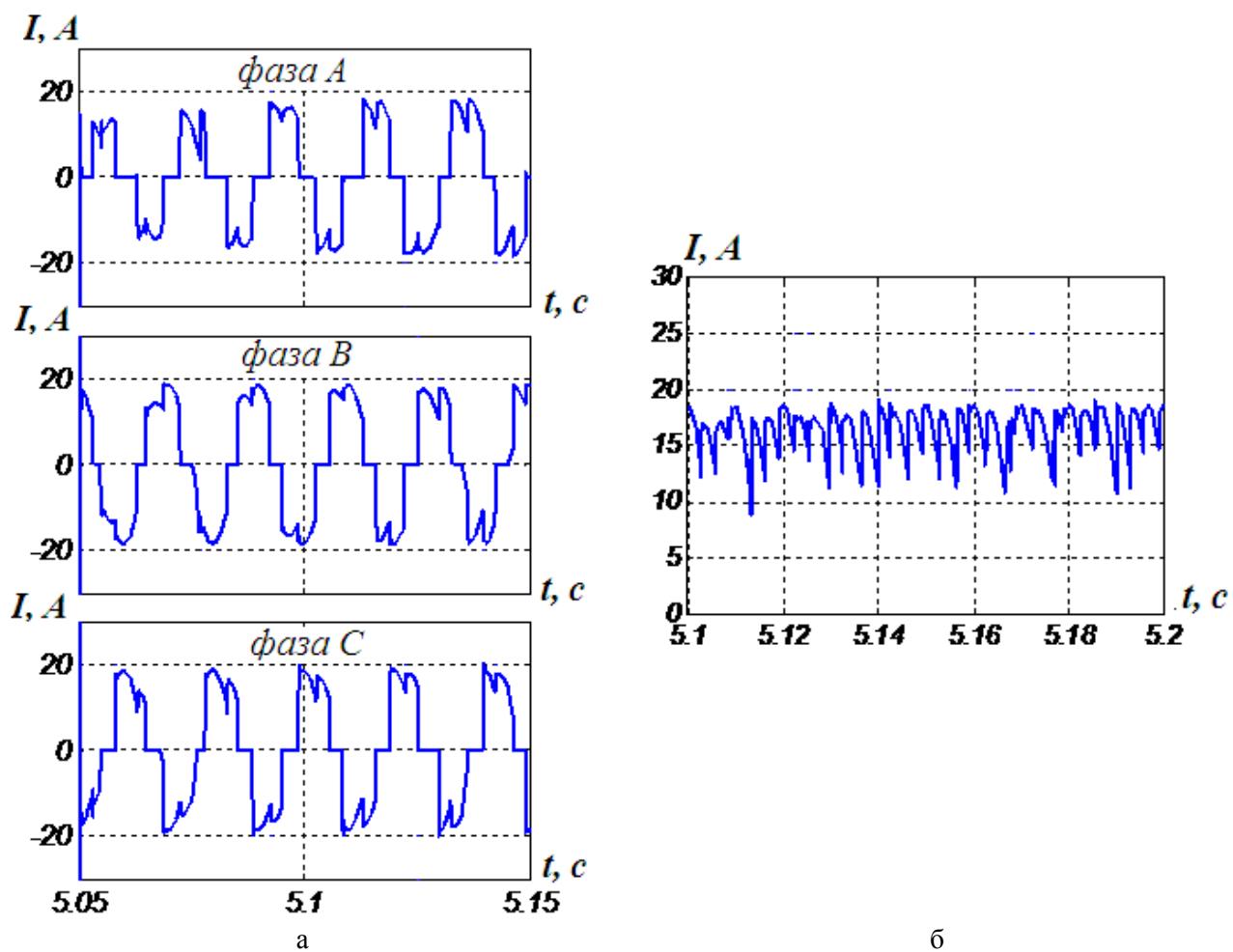


Рис. 7. Расчетные диаграммы фазных токов присоединения с цепью двухфазного КЗ при токоограничении резистором  $R=50$  Ом нагрузки выпрямителя с учетом влияния:  
а – обратных ЭДС АД; б – величины тока на выходе выпрямителя  $U=660$  В

## Выводы

Исследованиями установлены возможность и целесообразность применения дополнительного устройства ускоренного разъединения трехфазной схемы вторичной обмотки трансформатора участковой подстанции, функционирующего на основе эффекта плавкого предохранителя, в контексте решения задачи повышения ресурса подстанции и ее силовых коммутационных компонентов. Предложенная схема устройства ограничения тока в цепи отключения kortkого замыкания в присоединении трансформаторной подстанции участка шахты функционирует в автоматическом режиме и, в зависимости от комплектации, позволяет ограничивать продолжительность тока в цепи защитного отключения либо ограничивать его величину (после срабатывания предохранителя схемы). Такое техническое решение обеспечивает безаварийную эксплуатацию низковольтного автоматического выключателя А3792У в составе распределительного устройства низкого напряжения шахтной участковой трансформаторной подстанции при

величине линейного напряжения сети 1140 В, что обеспечивает приемлемые технические и экономические условия применения указанного уровня напряжения в электросети участка шахты.

Направлением дальнейших исследований является установление предельных временных параметров срабатывания устройства ускоренного разъединения трехфазной схемы вторичной обмотки трансформатора участковой подстанции.

## Список литературы

1. Маренич, О.К. Элементы конструкции автоматического выключателя А37ХХ как фактор возникновения его потенциально опасного состояния / О.К. Маренич, И.В. Ковалёва // Вестник ДонНТУ. – 2018. – №4. – С. 47-52.
2. Переходні процеси в системах електропостачання: підручник для вузів / Г.Г. Півняк [та ін.]; під ред. Г.Г. Півняка. – 2-е вид., доправ. та доп. – Дніпропетровськ: НГУ, 2002. – 579 с.
3. Ковальова, І.В. Дослідження процесу фор-

- мування зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна при короткому замиканні в живлячому кабелі з урахуванням впливу параметрів електротехнічного комплексу // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 20(182). – С. 35-39.
4. Лелёвкин, В.М. Численное моделирование характеристик открытой диафрагмированной

электрической дуги / В.М. Лелёвкин, В.Ф. Семёнов // Вестник КРСУ. – Бишкек: КРСУ, 2002. – №2. – С.25-34.

5. Патент на изобретение 102285 (UA), МПК (2013.01) H02H 3/00. Трифазный трансформатор напруги / К.М. Маренич, I.B. Ковалевова, О.К. Маренич. – а 2011 09048, заявл. 19.07.2011; опубл. 25.06.2013; бюл. №12.
6. Намитоков, К.К. Плавкие предохранители / К.К. Намитоков [и др.]. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.

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

### LIMITATION OF ELECTRIC CURRENT IN PROTECTIVE DISCONNECTING DEVICE AS INNOVATIVE DECISION FOR INCREASE OF LIFE OF MINE SECTION TRANSFORMER SUBSTATION

**Background.** The automatic power switch A3782 is a reliable device in the mine section electrotechnical complex with voltage 660 V. Its use in a network with voltage 1140 V is also expedient. However, there are cases when, after turning off ultrahigh short-circuit currents, conduction between phases occurs inside the circuit breaker, which leads to damage. It is important to develop a device to limit the current in the power circuit of the circuit breaker during the turning off ultrahigh short-circuit currents. This technical solution is innovation and allows increasing the life of the electrical power equipment of the mine section.

**Materials and/or methods.** Based on mathematical modelling and the use of the theory of electric arc, the possibility of formation of powerful ionisation processes in an automatic switch when the short-circuit current is disconnected in the electric network of high power with a voltage of 1140 V established. The structure of the current limiting device during the protective shutdown justified. Through modelling, the efficiency of the developed device confirmed.

**Results.** The device for limiting the current in the power circuit of the circuit breaker in the process of switching off the short circuit designed. Studies have confirmed the feasibility of its use and the possibility of increasing the life of the circuit breaker of the transformer substation of the mine section.

**Conclusion.** The resource of circuit A3792 breaker of mine section transformer substation can be upgraded. The use of this switch in the electrical network with a voltage of 1140 V is provided when using a device for limiting the current of the short circuit disconnection, the scheme of which is based on the rupture of the three-phase connection of the secondary windings of the transformer with a fuse. The results of the study confirmed the feasibility of this technical solution.

**Keywords:** electrical engineering complex, transformer substation, circuit breaker, short circuit, voltaic arc, resource, accelerated de-energisation, chart, model, analysis.

#### Сведения об авторах

##### И.В. Ковалёва

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

##### О.К. Маренич

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

Статья поступила 13.05.2019 г.  
© И.В. Ковалёва, О.К. Маренич, 2019  
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский