

УДК 622.012.2:621.316

И.В. Ковалёва /к.т.н./

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ЗАЩИТНОГО ОБЕСТОЧИВАНИЯ МЕСТА ВОЗНИКНОВЕНИЯ МЕЖДУФАЗНОГО ДУГОВОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОСЕТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЧАСТКА

Исследована компьютерная модель процесса междуфазного дугового замыкания в электросети, питающей асинхронные двигатели. Получены закономерности изменения величины тока статора двигателя с учетом параметров питающего кабеля и расстояния до места замыкания. Обоснован способ выявления процесса междуфазного дугового замыкания с дальнейшим быстродействующим двусторонним обесточиванием аварийного участка электросети.

Ключевые слова: *междуфазное дуговое замыкание, асинхронный двигатель, энергетический поток, гибкий кабель, двустороннее обесточивание, коммутационный аппарат, заземляющая жила.*

Постановка проблемы

Эксплуатация электромеханического оборудования технологических участков горных предприятий характеризуется нестационарностью его местонахождения, что, в свою очередь, обуславливает необходимость применения гибких кабелей. В то же время, в условиях шахты высока вероятность механического повреждения таких кабелей, что является причиной наиболее опасных аварийных состояний электротехнического комплекса – коротких замыканий (к.з.), и создает условия электропоражения человека. Действие существующих средств максимальной токовой защиты состоит в отключении аварийного участка электросети от источника питания со стороны участковой трансформаторной подстанции. Защитное действие аппарата защиты от утечек тока на землю также состоит в отключении сети участкового электротехнического комплекса от питающей подстанции в случае возникновения цепи повышенной проводимости между фазой и землей. Однако защитное действие указанных средств недостаточно, поскольку состояние электросети технологического участка шахты после отключения питающего напряжения некоторое время будет определяться параметрами обратных энергетических потоков асинхронных двигателей (АД) потребителей.

Кроме того, специфическим видом аварийного состояния силового присоединения шахтного участкового электротехнического комплекса является междуфазное дуговое замыкание, возникающее вследствие снижения изоляции между фазами силовой цепи. Одной из причин возник-

новения такого состояния является повреждение резиновой изоляции внутренних силовых жил кабеля оголенной заземляющей жилой при внешнем сверхсжатии кабеля, которое может иметь место в сложных условиях эксплуатации кабельной сети [1].

Опасность процесса состоит в том, что сопротивление электрической дуги не равно нулю и, как правило, соизмеримо с активным сопротивлением нагрузки силового присоединения (асинхронного двигателя потребителя). Следовательно, процесс дугового замыкания не будет выявлен средствами максимальной токовой защиты пускателей (или аналогичной коммутационной аппаратуры), хотя такое замыкание носит все признаки опасности открытого воспламенения в условиях шахты.

Аппарат защиты от утечек тока на землю может отключить место повреждения кабеля от питающей электросети только в том случае, если вследствие дугового замыкания возникнет цепь проводимости между фазой сети и землей.

Следовательно, для защитного отключения силовой цепи с междуфазным дуговым замыканием требуется специальное средство защиты. Как вариант, это может быть максимальная токовая защита с изменяемой уставкой срабатывания, величина которой снижается после окончания пуска асинхронного двигателя соответствующего присоединения [2].

Анализ исследований и публикаций

Комплексные исследования теории функционирования шахтных участковых электротехни-

ческих комплексов, а также создания технических средств защиты при возникновении аварийных состояний изложены в работах [3...5]. Главное внимание исследователи уделяют изучению процессов, сопровождающих возникновение короткого замыкания, утечки тока на землю и защитное отключение электросети от источника питания.

Развитие эта теория получила в работах [6,7], где рассмотрены процессы в структурных составляющих электротехнического комплекса участка шахты в момент возникновения и дальнейшего протекания аварийных состояний междуфазного замыкания и утечки тока на землю с учетом влияния обратных энергетических потоков ранее включенных асинхронных двигателей потребителей и параметров цепи устройства их подавления.

Поэтому, учитывая опасность междуфазного дугового замыкания в условиях эксплуатации электротехнического комплекса участка шахты, актуальным представляется исследование возникающих при этом процессов, в контексте необходимости применения средств подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя аварийного присоединения.

Цель исследования

Целью исследования является обоснование способа подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя потребителя, в питающем кабеле которого возникло дуговое замыкание, в контексте повышения безопасно-

сти эксплуатации электросети технологического участка шахты.

Результаты исследования

В состав шахтного участкового электротехнического комплекса, схема которого приведена на рис.1, входит трехфазный источник электропитания *TV* (комплектная трансформаторная подстанция (КТП) с автоматическим выключателем *SA* на выходе распределительного устройства (РУНН) низкого напряжения), от которого по магистральному кабелю *МК*, через коммутационные аппараты *KM₁-KM_n* (выполняют функции магнитных пускателей) по кабелям *ГК₁-ГК_n* подключены асинхронные двигатели *M₁-M_n* потребителей.

На рис.1 обозначено: u_{ϕ} – фазное напряжение питающего трансформатора; Z_{mp} , Z_{mk} , Z_{zk} – соответственно, полное сопротивление обмотки трансформатора, магистрального кабеля и гибкого кабеля; $R_{из \phi}$, $C_{из \phi}$ – соответственно, активное сопротивление и емкость изоляции фаз кабеля. Введем допущение, что схема статора АД *M₁* дополнительно оснащена коммутационным аппаратом *SF*, предназначенным для коммутации трехфазной схемы статорной обмотки асинхронного двигателя. В принятой расчетной схеме (рис. 1) имитация электрической дуги выполняется подключением активного сопротивления R_{δ} контактом *K1* между двумя фазами в питающей сети АД. Учитывая соизмеримость сопротивления дуги и активного сопротивления двигателей средней мощности, принимаем, что

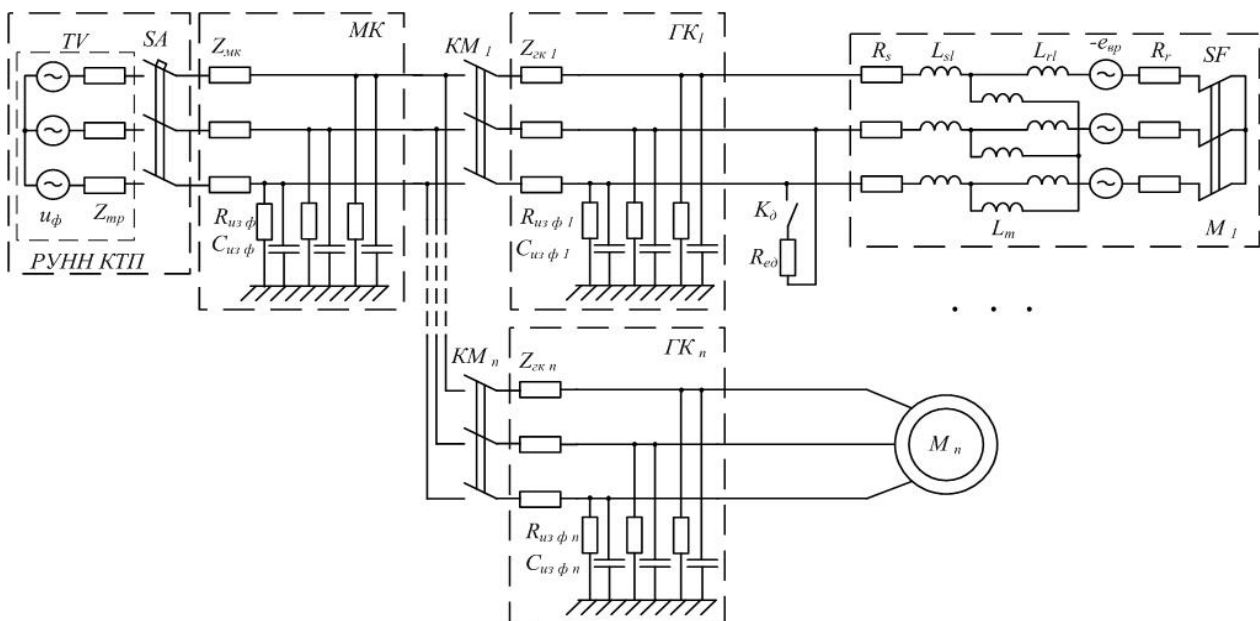


Рис. 1. Расчетная схема электротехнического комплекса участка шахты в состоянии дугового замыкания в питающем кабеле асинхронного двигателя



Рис. 2. Состояния электротехнического комплекса, принятые для исследования

сопротивление дуги находится в пределах $0,5 \text{ Ом} < R_d < 2 \text{ Ом}$.

Таким образом, исследованию подлежат параметры тока в питающей электросети АД на интервале его пуска, работы в номинальном режиме, в момент возникновения и дальнейшего протекания междуфазного дугового замыкания. При этом, в единых координатах времени (t) должны быть представлены токи всех трех фаз в электросети между участковой подстанцией и аварийной точкой; между асинхронным двигателем и аварийной точкой, а также в самом месте междуфазного дугового замыкания.

Следует также учесть следующие состояния электротехнического комплекса, приведенные на рис. 2.

Результаты исследований, приведенные в виде диаграмм тока (рис. 3, рис. 4) подтверждают предположение об опасности процесса и свидетельствуют о необходимости внедрения средств принудительного подавления энергетического потока асинхронного двигателя аварийного присоединения в случае возникновения междуфазного дугового замыкания в питающей электросети.

Техническая реализация принципа выявления междуфазного дугового замыкания с дальнейшим подавлением обратного энергетического потока АД может быть реализована путем определения разницы величин линейных токов в трехфазной схеме статора асинхронного двига-

теля аварийного присоединения с дальнейшим разъединением этой трехфазной схемы и присоединении обмотки одной из фаз статора двигателя к его заземленному корпусу через резистор активного сопротивления. При условии применения аппарата защиты от утечек тока на землю (АЗУР) это обеспечит быстродействующее двустороннее обесточивание аварийной точки силового присоединения в участковом электротехническом комплексе шахты (одновременно с защитным отключением питающей электросети со стороны трансформаторной подстанции). Таким образом, будет достигнуто выполнение функции предупреждения пожара, обусловленного током междуфазного дугового замыкания в питающем кабеле асинхронного двигателя [8].

Структурная схема соответствующего устройства защиты представлена на рис. 5.

Устройство защиты представляет собой трехполюсный аппарат коммутации (контактор $KM1$) трехфазной схемы статора Z_{SA} ; Z_{SB} ; Z_{SC} асинхронного двигателя потребителя технологического участка.

В цепях линейных токов статора (в «звезде» статорной обмотки АД) предусмотрены трансформаторы токов, соответственно, $TA1$; $TA2$; $TA3$, соединенные выходами с входом выпрямителя $VC1$. Нагрузкой этого выпрямителя является цепь последовательного соединения потенциометра $R1$ и конденсатора $C1$. Это дает возможность выделить на потенциометре $R1$

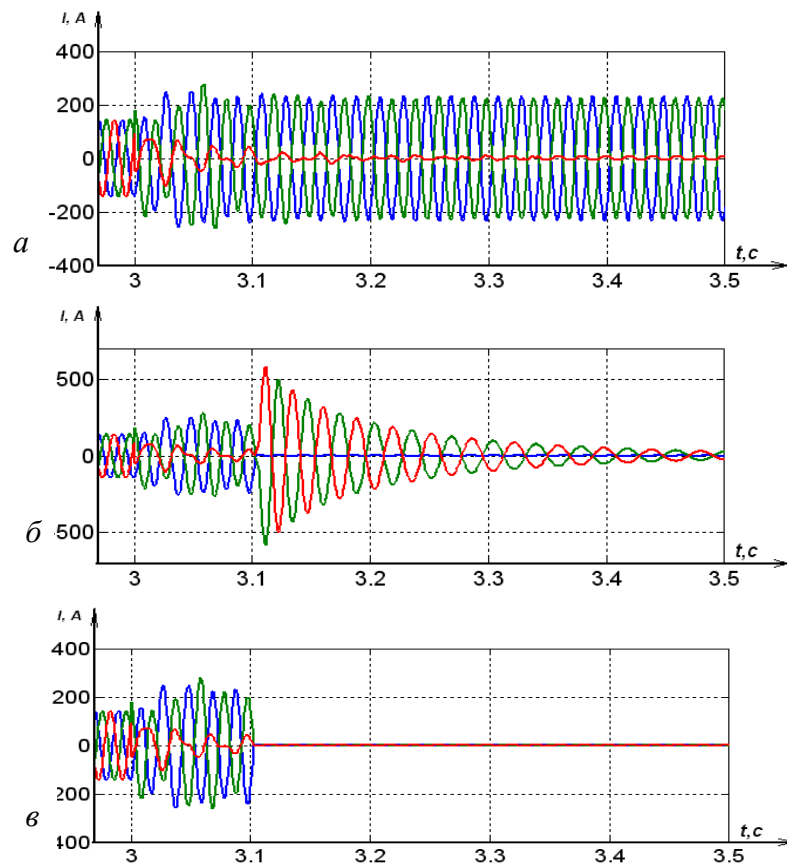


Рис. 3. Диаграммы тока в аварийной точке при возникновении дугового замыкания в питающем кабеле асинхронного двигателя:
 а – состояние № 1; б – состояние № 2; в – состояние № 3

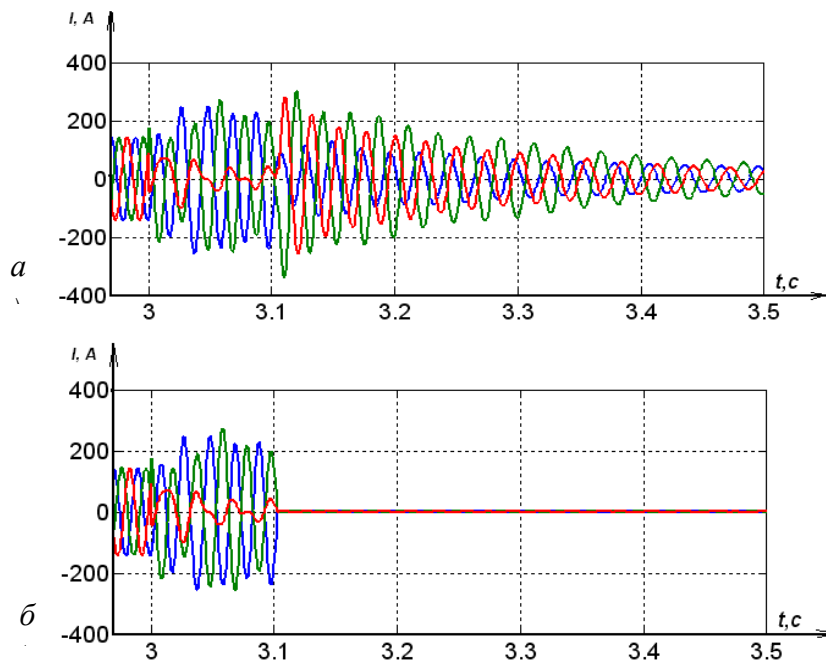


Рис. 4. Диаграммы тока в аварийной точке при возникновении дугового замыкания в питающем кабеле асинхронного двигателя при работе всех потребителей технологического участка:
 а – состояние № 4; б – состояние № 5

переменную составляющую выпрямленного напряжения (с выхода $VC1$), пропорциональную вторичному току трансформаторов $TA1-TA3$.

В нормальном режиме работы электротехнического комплекса, при отсутствии дугового замыкания в сети электропитания асинхронного двигателя все три линейные тока его статора, соединенного в трехфазную схему размыкающими контактами контактора $KM1$, будут одинаковыми. Вторичные токи трансформаторов тока $TA1-TA3$ также не отличаются по величине друг от друга. Будучи поданными на выпрямитель $VC1$, они создают на резистивном делителе напряжения (потенциометре $R1$) переменную составляющую напряжения стабильной величины и формы.

В случае возникновения междуфазного дугового замыкания (обозначено резистором R_d) в сети электропитания асинхронного двигателя, линейный ток его статора, контролируемый трансформатором тока $TA2$, будет существенно отличаться от других двух линейных токов трехфазной обмотки статора. При этом будут возникать импульсы повышенной амплитуды в переменной составляющей выходного напряже-

ния на резистивном делителе напряжения $R1$ активно-емкостной нагрузки выпрямителя $VC1$. Это приведет к срабатыванию реагирующего органа (PO) и исполнительного коммутационного аппарата $ИКА$. Замыкающий контакт $KM1.1$ этого аппарата присоединяет статорную обмотку асинхронного двигателя к его заземленному корпусу (заземляющий болт) через резистор $R2$, что приводит к возникновению искусственной утечки тока на землю и, как следствие, к срабатыванию участка защитного аппарата от утечек тока на землю (АЗУР) в распределительном устройстве низкого напряжения участковой комплектной трансформаторной подстанции (РУНН КТП).

По команде последнего отключится автоматический выключатель $SF1$ КТП. Одновременно с этим, исполнительный коммутационный аппарат ($ИКА$) разомкнет свои размыкающие контакты (трехфазная система $KM1$), что приведет к разрыву трехфазной схемы соединения статорных обмоток двигателя, и предотвратит электропитание поврежденной точки сети со стороны обратного энергетического потока асинхронного двигателя.

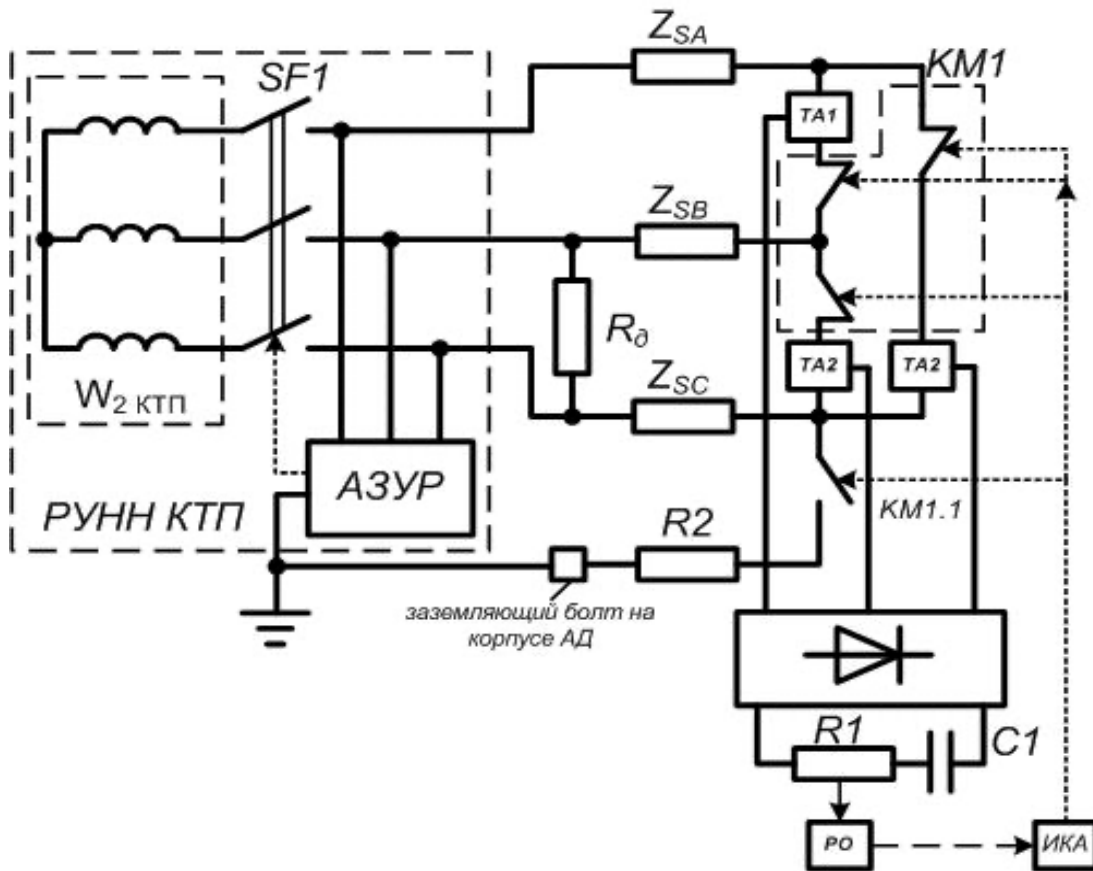


Рис. 5. Структурная схема устройства подавления обратного энергетического потока АД в электротехническом комплексе участка шахты при возникновении междуфазного дугового замыкания в питающем кабеле

Это обеспечит двустороннее обесточивание места возникновения междуфазного дугового замыкания в сети электропитания АД шахтного участкового электротехнического комплекса.

В случае возникновения междуфазного дугового замыкания в электросети после ее отключения при условии нахождения асинхронного двигателя потребителя в состоянии свободного выбега, также будет иметь место неодинаковость линейных токов, контролируемых трансформаторами тока ТА1-ТА3. Это приведет к срабатыванию реагирующего органа РО и исполнительного коммутационного аппарата ИКА, который отключением контактов трехфазной контактной группы КМ1 подавит обратный энергетический поток со стороны статора асинхронного двигателя и обесточит место повреждения (возникновения междуфазного дугового замыкания) в сети его электропитания.

Выводы

Получена закономерность изменения величины тока в элементах статора асинхронного двигателя при возникновении междуфазного дугового замыкания с учетом параметров питающего кабеля, включая расстояние до места повреждения.

Обоснован способ выявления этого аварийного состояния измерения тока в цепи статора АД и устройство подавления его обратного энергетического потока.

Список литературы

1. Демченко О.А. Обоснование мер предотвращения взрывов при эксплуатации гибких силовых кабелей на угольных шахтах: дис. ...канд. техн. наук: спец. 05.26.01 / Демченко Олег Александрович. – Макеевка, 2011. – 194 с.
2. Устройство для максимальной токовой защиты электродвигателей: А. с. 1494103 СССР, МПК⁵Н02Н7/08. / И.Т. Сидоренко,

- К.Н. Маренич, С.В. Дзюбан (СССР). – №4300883/24-07; заявл. 02.06.87; опубл. 15.07.89, Бюл. №26.
3. Риман Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт / Я.С. Риман. – М.: Недра, 1977. – 206 с.
4. Дзюбан В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения / В.С. Дзюбан – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
5. Переходные процессы в системах электро-снабжения: [уч. для вузов. Изд.2-е, дораб. и доп.] / Г.Г Пивняк, В.М. Винославский, А.Я. Рибалко, Л.И. Несен; под ред. Академика НАН Украины Г.Г. Пивняка. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2002. – 579 с.
6. Маренич К.М. Математичне моделювання короткого замикання в живлячому кабелі електротехнічного комплексу дільниці шахти / К.М. Маренич, І.В. Ковальова // Наківі праці Донецького національного технічного університету. Випуск 21(189), серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 126-136.
7. Маренич К.М. Удосконалення засобу відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна / К.М. Маренич, І.В. Ковальова // // Наківі праці Донецького національного технічного університету. Випуск 1-2(), серія «Електротехніка і енергетика». - Донецьк: ДонНТУ, 2012. – С. 126-136.
8. Спосіб струмового захисту в мережі живлення асинхронного двигуна в складі гірничого дільничного електротехнічного комплексу: патент на винахід 97592 (UA), МПК (2006.01) Н02Н 3/10, Н02Н 7/08, Н02Н 7/09 / К.М. Маренич, І. В. Ковальова, С.В. Василець. – а 2010 015324. Заявл. 20.12.2010; Опубл. 27.02.2012, Бюл. №4.

I.V. Kovalyova /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

JUSTIFICATION OF THE METHOD OF POWER SUPPLY DISCONNECTION OF PHASE TO PHASE ELECTRICAL ARCING IN THE POWER NETWORK OF THE INDUCTION MOTOR

Background. Operating conditions of electromechanical equipment of mine technological section is determined by its location nonstationarity, which, in turn, makes it necessary to use of flexible cables. Phase to phase electrical arcing is the specifically view of emergency conditions in power supply of the mine section electrotechnical complex, occurs as a result of insulation damage of internal power wires by bare ground wire with increased external compression of the cable, that is determined by complex operating conditions

the cable network. In this case, the resistance of an electric arc maybe comparable with the load resistance and arcing process will not be detected by overcurrent protection means.

Results. *We studied computer models of the process of phase to phase electrical arcing in the power network of the induction motor and obtained the laws of the value of its stator current taking into account the parameters of the feeder cable and the distance to the fault location. We considered the way of defining the state of phase to phase electrical arcing with further fast disconnection of emergency point of power connection, which is based on determining the difference of the linear currents in three-phase induction motor stator circuit emergency network with followed disconnection of the three-phase circuits and connection one of the phase windings of the induction motor stator to its normally earthed body through the resistor. This provides a quick acting two-end power supply disconnection emergency conditions in power supply of the mine section electrotechnical complex.*

Keywords: *phase to phase electric arcing, induction motor, two-end power supply disconnection, flexible cable, protection device, ground wire.*

Сведения об авторе

И.В. Ковалёва

SPIN-код: 5187-2555

ORCID ID: 0000-0002-6437-5683

Телефон: +7 (949) 334-91-00

Эл. почта: visara85@mail.ru

Статья поступила 22.02.2022 г.

©И.В. Ковалёва, 2022

Рецензент д.т.н., проф. В.Н. Павлыш