

Посткоммутационное импульсное закорачивание фаз как фактор повышения безопасности эксплуатации шахтной участковой электрической сети напряжения 3,3 кВ

К.Н. Маренич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Горная электротехника и автоматика» Донецкого национального технического университета, г. Донецк, Российская Федерация

С.А. Руссиян, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Донецкого национального технического университета, г. Донецк, Российская Федерация

А.И. Денисова, аспирант кафедры «Горная электротехника и автоматика» Донецкого национального технического университета, г. Донецк, Российская Федерация

Введение

Одним из основных факторов, обуславливающих производимость уголедобывающего участка шахты, является мощность технологического оборудования. До последнего времени большинство механизированных комплексов высокопроизводительных участков угольных шахт рассчитывалось на работу при напряжении 1140 В. Однако решение задач повышения производительности, ресурса, уровня безаварийности рудничных технологических установок обуславливает необходимость увеличения мощности электроприводов горных машин, что, в свою очередь, предопределяет перевод шахтных участковых электрических сетей на

более высокий уровень номинального линейного напряжения 3,3 кВ [1, 2]. Но в этом случае существенно ухудшаются условия обеспечения безопасности эксплуатации шахтной участковой электрической сети при касании человеком фазного проводника, что обусловлено повышением тока в цепи утечки на землю и, соответственно, ростом скорости накопления количества электричества в цепи утечки (в теле человека). В свете этого критериям научной и практической актуальности отвечает задача анализа функциональных возможностей известных способов ограничения электропоражающего фактора применительно к шахтной участковой электрической сети напряжения 3,3 кВ и обоснования целе-

Посткоммутационное импульсное закорачивание фаз как фактор повышения безопасности эксплуатации шахтной участковой электрической сети напряжения 3,3 кВ

К.Н. Маренич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Горная электротехника и автоматика» Донецкого национального технического университета, г. Донецк, Российская Федерация

С.А. Руссиян, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Донецкого национального технического университета, г. Донецк, Российская Федерация

А.И. Денисова, аспирант кафедры «Горная электротехника и автоматика» Донецкого национального технического университета, г. Донецк, Российская Федерация; e-mail: denisova_anastasi@mail.ru

Аннотация: Проанализирована эффективность замыкания поврежденной фазы сети на землю в контексте поиска путей повышения показателей электробезопасности эксплуатации шахтных участковых электросетей напряжения 3,3 кВ. В контексте обеспечения защиты человека от поражения электрическим током обоснована целесообразность и приведено техническое решение посткоммутационного импульсного закорачивания фаз в цепи действия обратных ЭДС асинхронных двигателей электропотребителей технологического участка шахты.

Ключевые слова: шахта, электросеть, утечка тока на землю, безопасность, поврежденная фаза, ЭДС выбега, напряжение, замыкание, моделирование, расчёт, схема

Post-commutation pulse phase shorting as a factor in improving the safety of operation of a 3.3 kV mine site electric network

K.N. Marenich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mining Electrical Engineering and Automation, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation

S.A. Russijan, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Donetsk National Technical University

A.I. Denisova, Postgraduate Student, Department of Mining Electrical Engineering and Automation, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation; e-mail: denisova_anastasi@mail.ru

Abstract: The efficiency of ground short-circuiting the damaged phase of the network to the ground is analyzed in the context of finding ways to increase the electrical safety of mine site 3.3 kV power network operation. In the context of ensuring human protection from electric shock, the expediency is justified and a technical solution for post-commutation pulse phase short-circuiting in the reverse EMF circuit is provided for the asynchronous motors of the power consumers within a technological mine site.

Keywords: : mine, power network, electrical ground leakage, safety, damaged phase, run-out EMF, voltage, short circuiting, modeling, calculation, circuit

сообразности посткоммутационного импульсного закорачивания фаз на выходе силовых устройств коммутации электродвигателей шахтных технологических установок.

Анализ известных исследований и публикаций

Основные положения концепции защиты от утечек тока на землю отражены в исследованиях [3, 4, 5] и состоят в:

- выявлении факта возникновения цепи утечки тока на землю методом сравнения постоянного оперативного тока, подаваемого в сеть, с эталонным током во внутреннем контуре аппарата защиты;
- компенсации ёмкостной составляющей тока утечки регулируемым (автоматическая компенсация [6]) либо нерегулируемым (статическая компенсация) дросселем;
- выявлении и закорачивании на землю через сопротивление малой величины ($R = 100 \text{ Ом}$) повреждённой фазы (фазы, к которой прикоснулся человек).

В исследовании [7] дан анализ факторов ограничения функции защиты человека от электропоражения в электрической сети участка шахты, из которого следует, что ёмкостная проводимость изоляции кабельной сети является наиболее значимым параметром в контексте формирования электропоражающего фактора. Однако компенсация ёмкостной составляющей тока утечки на землю применяемыми автокомпенсаторами реализуется не в полной мере из-за низкой добротности дросселей и наличия отклонений в точности настройки управляющих устройств. В связи с этим рекомендованными средствами ограничения количества электричества в теле человека (цепи утечки на землю) при касании к фазе сети линейного напряжения 1140 В являются частичная компенсация ёмкостного тока утечки статическими устройствами, а также выявление и закорачивание на землю повреждённой фазы.

Анализ работы устройств выявления повреждённой фазы, реагирующих на дисбаланс разностей потенциалов между фазами сети и землёй, выявил ограничение области их применения (электрические сети с ёмкостью изоляции не более 1.0 мкФ/фазу), что препятствует созданию шахтных участков электротехнических комплексов повышенной мощности (с протяжёнными кабелями больших сечений). В связи с этим в аппарате защиты АЗУР-4МК для электрических сетей линейного напряжения 1140 В реализован альтернативный способ выявления повреждённой фазы, основанный на измерении и сопоставлении фазовых соотношений токов и напряжений. Однако этот способ исключает применение индуктивных средств компенсации ёмкостных токов утечки на землю [5].

Рассматривая перспективы эксплуатации шахтных участков электрических сетей линейного напряжения 3,3 кВ, следует признать, что, с учётом величины этого напряжения, уместны все доступные способы ограничения тока, количества электричества в цепи утечки на землю. Поэтому концептуальное решение, составляющее основу проектируемого аппарата защиты АЗУР-5 (для сетей напряжения 3,3 кВ) предполагает применение как статического компенсатора ёмкостных токов утечки, так и определителей и короткозамыкателей на землю повреждённой фазы [1, 2]. В этом случае практический интерес представляет установление приемлемых продолжительностей реализации защитной функции. При этом следует также учесть формирование электропоражающего фактора обратными ЭДС асинхронных двигателей (АД) в режиме выбега (что не подавляется ни одним из известных средств защиты от утечек тока на землю). Действие этих ЭДС выбега АД будет продолжаться после срабатывания защиты от утечек тока на землю и

разъединения контактных групп силовых коммутационных аппаратов (т.к. при таком разъединении прекращается защитная функция короткозамыкателя повреждённой фазы) [8]. Альтернативным техническим решением в этом случае может быть посткоммутационное закорачивание фаз на выходе силовых коммутационных аппаратов.

Результаты и обсуждение

Процессы в электрической сети участка шахты при линейном напряжении 3.3 кВ, обусловленные возникновением однофазной утечки ($R_{\text{ут}} = 1,0 \text{ кОм}$) на землю, сопровождающиеся действием средств защитного отключения, в т.ч. при наличии/отсутствии эффекта закорачивания на землю повреждённой фазы, могут быть рассмотрены на примере исследования компьютерной модели, где в качестве исходных данных и принятых допущений принято следующее:

- тип участковой комплектной трансформаторной подстанции (КТП) – ВСТП-КРУ-1000-6/3,3 ($S_H = 1000 \text{ кВА}$; $U_{1H} = 6 \text{ кВ}$; $U_{2H} = 3,3 \text{ кВ}$; Y/Y-0);
- количество силовых присоединений – 2;
- потребитель первого присоединения – асинхронный двигатель 1МА4350-2СН30 ($U_H = 3,3 \text{ кВ}$, $P_H = 315 \text{ кВт}$);
- потребитель второго присоединения – асинхронный двигатель 1МА4354-2СН30 ($U_H = 3,3 \text{ кВ}$, $P_H = 400 \text{ кВт}$) [9];
- параметры дросселя статической компенсации ёмкости изоляции сети: активное сопротивление $R_K = 146 \text{ Ом}$; индуктивность $L_K = 6 \text{ Гн}$.

Активные сопротивления R и ёмкости C изоляции кабелей:

- магистрального (от КТП до пускателей): $R_0 = 0,5 \text{ МОм/фазу}$; $C_0 = 0,3 \text{ мкФ/фазу}$;
- гибкого кабеля 1-го присоединения: $R_1 = 0,5 \text{ МОм/фазу}$, $C_1 = 0,3 \text{ мкФ/фазу}$;
- гибкого кабеля 2-го присоединения: $R_2 = 0,5 \text{ МОм/фазу}$, $C_2 = 0,2 \text{ мкФ/фазу}$.

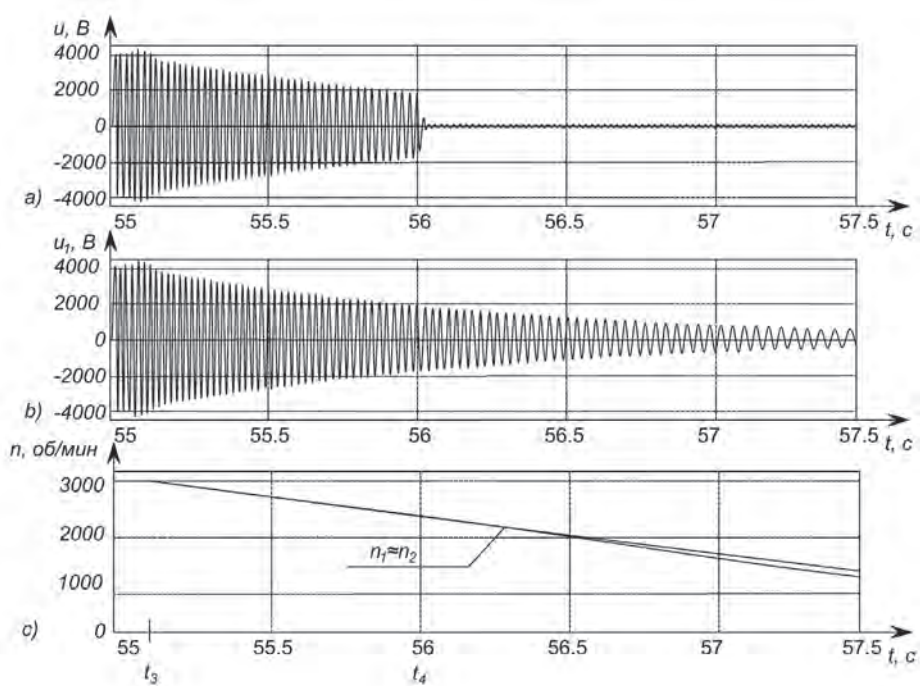
В структуре модели компенсирующий дроссель, входящий в схему аппарата защиты от утечек тока на землю (АЗ), присоединён между нулевой точкой (соединения в «звезду») трёхфазной вторичной обмотки трансформатора КТП и цепью заземления. При этом схема АЗ содержит также блок выявления и замыкания на землю повреждённой фазы (фазы, в которой возникла цепь утечки тока на землю).

В ходе исследования фиксируются напряжения на выходе КТП и в месте возникновения утечки тока на землю; величины частот вращения роторов 1-го и 2-го электродвигателей; количество электричества q , прошедшего через сопротивление цепи, утечки и величина тока в этой цепи.

Алгоритм моделирования состоит в следующем:

- шаг 1: электрическая сеть функционирует в нормальном режиме до возникновения цепи утечки тока на землю в момент t_1 ;
- шаг 2: электрическая сеть функционирует при наличии однофазной утечки на землю ($R_{\text{ут}} = 1,0 \text{ кОм}$) на интервале времени $t_1 \leq \Delta t_1 \leq t_2$, в течение которого аппаратными средствами производится выявление состояния утечки и формирование команды на отработку защитной функции;
- шаг 3: в момент t_2 – закорачивание на землю повреждённой фазы;
- шаг 4: в момент t_3 – отключение коммутационного аппарата КТП;
- шаг 5: в момент t_4 в сети отключаются коммутационные аппараты 6 и 7 силовых присоединений вследствие снижения напряжения на обмотках их электромагнитных исполнительных устройств.

Рис. 1 Диаграммы мгновенных значений линейного напряжения на выходе участковой трансформаторной подстанции (а), линейного напряжения в месте возникновения цепи утечки тока на землю (b) и частот вращения роторов двигателей (с)



Результаты моделирования представлены диаграммами изменения физических параметров объекта исследования, которые позволяют оценить эффективность замыкания повреждённой фазы на землю. Напряжение u на выходе КТП до момента t_3 защитного отключения её коммутационного аппарата представляет собой синусоиду с установившейся амплитудой (рис. 1, а), а после этого момента – поддерживается обратными ЭДС группового выбега асинхронных двигателей присоединений (рис. 1, б), амплитуда и частота которых снижаются во времени экспоненциально с постоянной времени, определяемой соотношением индуктивностей и активных сопротивлений обмоток последних [8]. Частота вращения роторов двигателей уменьшается по близкому к линейному закону (рис. 1, с). В момент t_4 отключаются КА присоединений (вследствие снижения напряжения на обмотках электромагнитных исполнительных устройств коммутации), что обеспечивает отделение выходных цепей силового трансформатора КТП от АД.

В случае отсутствия функции закорачивания на землю повреждённой фазы сети ток утечки на интервале $t_1 - t_3$ поддерживается напряжением сети, на интервале $t_3 - t_4$ – ЭДС группового выбега асинхронных двигателей, а после момента t_4 – ЭДС выбега двигателя аварийного присоединения №2 (рис. 2, а). Ёмкостная составляющая тока утечки на землю уменьшается компенсатором до момента t_4 , а после отключения КА аварийного присоединения компенсатор не влияет на состояние цепи утечки тока на землю. Количество электричества, прошедшего через сопротивление цепи утечки тока на землю за время аварийного процесса при отсутствии замыкания повреждённой фазы на землю, составляет около 500 мА·с (рис. 2, с, кривая 1), что существенно превышает предельно допустимый уровень $q = 50$ мА·с [10].

Закорачивание повреждённой фазы сети на землю в момент t_2 позволяет снизить до нуля ток через сопротивление цепи утечки (рис. 2, б). Однако защитное действие короткозамыкателя ограничено нахождением КА во включенном состоянии, т.е., интервалом $t_2 - t_4$. После момента t_4 короткозамыкатель не влияет на состояние цепи утечки тока на землю, поскольку электрически отделяется от неё, и ток в цепи утечки на землю поддерживается ЭДС выбега соответствующего двигателя. На интервале $t_2 - t_4$ кривая накопления количества электричества в цепи сопротивления утечки остаётся установившейся (рис. 2, с, кривая 2). Совокупное количество электричества через сопротивление цепи утечки составляет 120 мА·с, что недостаточно для обеспечения электробезопасности.

Для улучшения параметров электробезопасности представляется целесообразным принудительно удерживать коммутационные аппараты силовых присоединений во включенном состоянии на протяжении времени затухания ЭДС асинхронных двигателей. В этом случае ток через цепь утечки протекает только в течение интервала $t_1 - t_2$. Короткозамыкатель эффективно снижал бы ток в цепи утечки после момента t_2 до затухания ЭДС двигателя соответствующего присоединения. Общее количество электричества через цепь сопротивления утечки в этом случае применительно к параметрам электромеханического комплекса, принятым при моделировании, составляет около 25 мА·с (рис. 2, с, кривая 3), что соответствует требованиям электробезопасности эксплуатации участковых электросетей [10].

Оценку эффективности защитного закорачивания на землю повреждённой фазы сети напряжения 3,3 кВ возможно выполнить по однофазной схеме замещения (рис. 3, а), где приняты следующие обозначения: e_1 – источник ЭДС, соответствующий фазному напряжению вторичной обмотки участкового силового трансформатора; e_2 – фазная ЭДС вращения асинхронного двигателя (№2) аварийного присоединения; R_b – сопротивление цепи утечки тока на землю; C_1, R_1 – ёмкость и активное сопротивление фаз кабеля аварийного присоединения; C_0, R_0 – то же для общей части сети и кабелей других присоединений; R_k, L_k – активное сопротивление и индуктивность компенсирующего дросселя. На интервале $t_1 < t < t_2$ (от возникновения утечки тока на землю до защитного замыкания на землю повреждённой фазы сети) ток утечки рассчитывается в соответствии с зависимостью (рис. 3, б):

$$i_1 = [e(t) - u_1] / R_b, \tag{1}$$

где $e(t)$ – фазное напряжение сети в месте возникновения утечки (между узлами 1 и 3 схемы замещения); u_1 – напряжение между узлами 2 и 3, которое вычисляется путём решения системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} du_1 / dt = [(e(t) - u_1) / R_a - u_1(R_0 + R_1) / R_0 R_1 - i_6] / (C_0 + C_1), \\ di_6 / dt = (u_1 - R_k i_6) / L_k, \end{cases} \tag{2}$$

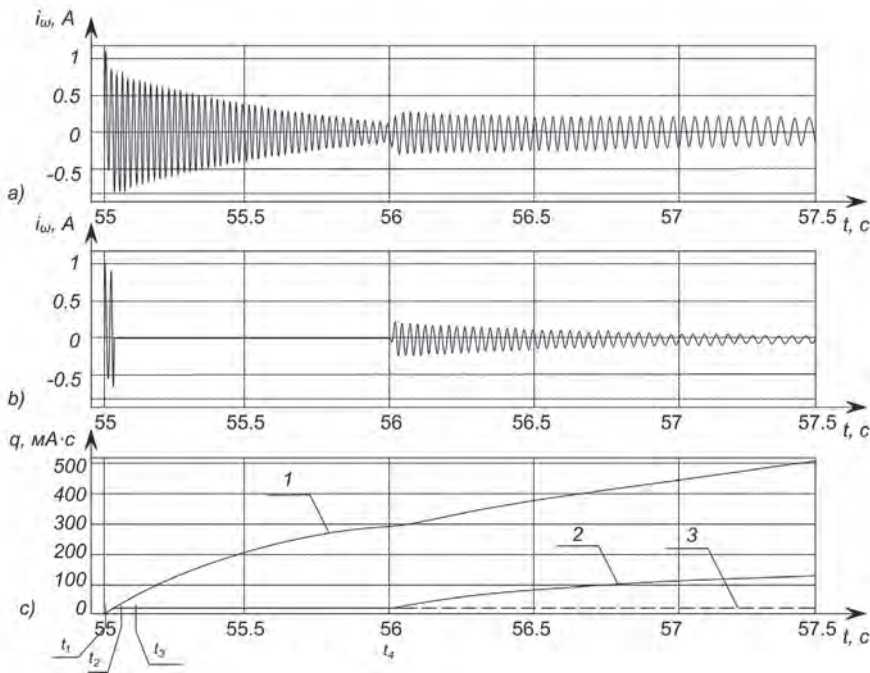


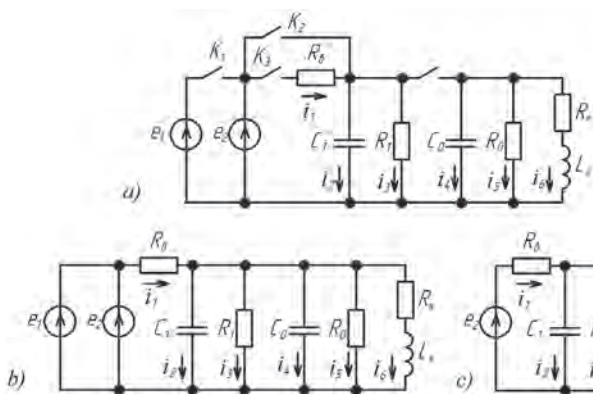
Рис. 2 Диаграммы тока утечки (i_1) на землю при отсутствии (а) и наличии (б) закорачивания повреждённой фазы сети на землю; диаграммы накопления количества электричества (q) в цепи сопротивления утечки на землю (с) при отсутствии закорачивания повреждённой фазы сети на землю (кривая 1), при её закорачивании на землю: в момент t_4 коммутационный аппарат присоединения отключается (кривая 2); не отключается (кривая 3)

На интервале $t_2 < t < t_4$ сопротивление цепи утечки зашунтировано короткозамыкателем, и ток в цепи утечки на землю равен нулю. После момента t_4 отключения контактора пускателя ток в цепи утечки на землю определяется в соответствии с зависимостью:

$$i_1 = (e_2 - u_1) / R_6, \tag{3}$$

где напряжение определяется путём вычисления дифференциального уравнения:

$$du_1 / dt = (i_1 - u_1 / R_1) / C_1. \tag{4}$$



Временной интервал	Состояния ключей			
	K_1	K_2	K_3	K_4
$t < t_1$	1	1	0	1
$t_1 < t < t_2$	1	0	1	1
$t_2 < t < t_3$	1	1	1	1
$t_3 < t < t_4$	0	1	1	1
$t > t_4$	0	0	1	0

Рис. 3 Схемы замещения сети: а – универсальная для всех этапов аварийного процесса; б – в момент возникновения утечки тока на землю; с – после отключения контактора присоединения с целью утечки тока на землю

Однако для технической реализации поддержания электрического контакта короткозамыкателя повреждённой фазы с точкой возникновения утечки тока на землю должны быть решены следующие проблемные вопросы:

- в случае отключения коммутационного аппарата КТП велика вероятность отключения группового автоматического выключателя распределительного пункта технологического участка от срабатывания его нулевого расцепителя;
- принимая во внимание, что коммутационными аппаратами силовых присоединений являются магнитные пускатели, следует учесть значительный диапазон токов отпущения их контакторов, что исключает использование обратных ЭДС асинхронных двигателей потребителей в качестве напряжения питания контакторов на временном интервале после момента t_4 и обуславливает необходимость применения дополнительного аккумуляторного источника питания и системы управления состоянием контактора (на интервале отключения).

Альтернативным техническим решением является применение посткоммутационного импульсного закорачива-

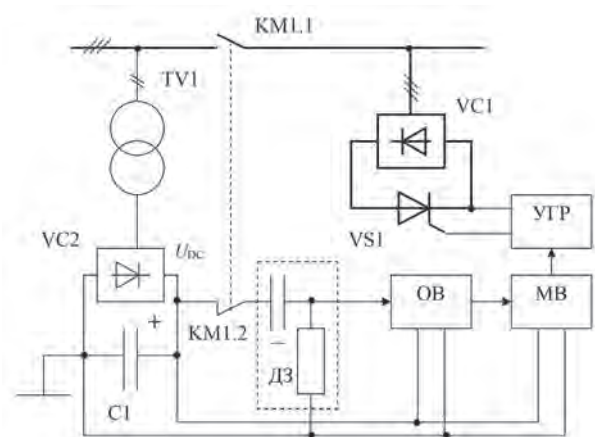


Рис. 4 Схема устройства посткоммутационного импульсного закорачивания фаз силового присоединения электрической сети участка шахты

ния фаз на выходе коммутационного аппарата. Устройство, реализующее этот способ (рис. 4), содержит мостовой выпрямитель $VS1$ на выходе силовой цепи контактора $KM1.1$ пускателя, нагруженный тиристором $VS1$. Управление последним осуществляется по цепи: дифференцирующее звено (ДЗ) \rightarrow мультивибратор (ОВ) \rightarrow мультивибратор (МВ) \rightarrow узел гальванической развязки (УГР). Со стороны силового ввода контактора $KM1.1$ предусмотрен трансформатор $TV1$ с выпрямителем $VC2$ и электролитическим конденсатором большой ёмкости $C1$ для формирования напряжения U_{DC} постоянного тока, подаваемого на вход ДЗ через слаботочный размыкаемый контакт $KM1.2$ контактора пускателя, а также служащего для электропитания функциональных узлов ОВ, МВ и УГР на интервале защитного отключения контактора $KM1.1$.

При включении контактора его контакт $KM1.2$ разомкнут и управляющее воздействие на тиристор $VS1$ не осуществляется. При возникновении цепи утечки тока на землю отключается силовой коммутационный аппарат КТП. В этом случае при отключении контактора ($KM1.1$) электролитический конденсатор $C1$ большой ёмкости поддерживает некоторое время формирование напряжения U_{DC} постоянного тока. Контакт $KM1.2$ контактора замыкается, подавая напряжение U_{DC} на вход дифференцирующего звена (ДЗ). С выхода последнего короткий импульс напряжения, соответствующий началу процесса отключения контактора $KM1.1$, поступает на вход мультивибратора, на выходе которого формируется импульс напряжения ограниченной фиксированной продолжительности $\Delta t_{\text{н}}$, что приводит к формированию на выходе мультивибратора (на интервале $\Delta t_{\text{н}}$) пакета импульсов высокой частоты. Узел УГР осуществляет передачу последних на цепь управления тиристора $VS1$ и гальваническую развязку между устройством управления тиристором $VS1$ и

силовыми цепями пускателя. При этом тиристор $VS1$ отпирается, что приводит к посткоммутационному импульсному (кратковременному) закорачиванию фаз в цепи действия обратных ЭДС АД и обесточиванию цепи утечки тока на землю в присоединении между пускателем и асинхронным двигателем. Процесс протекает до полного подавления этих ЭДС.

Актуальность применения данного устройства распространяется также на процесс отключения пускателя техническими средствами защит от аварийных (опасных) состояний.

Выводы

Выявление и закорачивание на землю повреждённой фазы шахтной участковой электрической сети номинального линейного напряжения 3,3 кВ позволяет снизить величину количества электричества в теле человека в случае его прикосновения к фазному проводнику. Однако защитная функция имеет ограниченную продолжительность и прекращается после отключения силового коммутационного аппарата участковой комплектной трансформаторной подстанции. При этом не устраняется электропоражающий фактор, обусловленный действием обратных ЭДС асинхронных двигателей потребителей.

Эффективность защитной функции может быть повышена на основе посткоммутационного импульсного закорачивания фаз в цепи действия обратных ЭДС асинхронного двигателя электропотребителя. Техническая реализация данного способа адаптируется со схемой шахтного магнитного пускателя.

Список литературы

1. Дзюбан В.С. Требования к взрывозащищенному электрооборудованию и системам электроснабжения горных машин на напряжение 3(3,3) кВ / В.С. Дзюбан, Н.М. Басов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ.– Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2009. – С. 209-213.
2. Требования к изготовлению рудничного взрывозащищенного электрооборудования на напряжение 3(3,3) кВ. – Макеевка: МакНИИ, 2007. – 30 с.
3. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
4. Вареник Є.О. Обмеження та захист від витоків струму у рудничних електроустановках напругою 1200 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Вареник Євген Олександрович. – Днепропетровск, 2004. – 191 с.
5. Савицкий А.В. Новая серия микроконтроллерных аппаратов защиты от токов утечки на землю в шахтных распределительных сетях на напряжении до 1200 В / А.В. Савицкий // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка та електроенергетика» № 2(15)'2013. – Донецк. ДонНТУ. – С. 211-216.
6. А.с. 1229897 СССР, МПК H02H9/08 Устройство автоматической компенсации ёмкостного тока утечки / В.С. Прудников, В.Ф. Костин, Ю.И. Слепцов (СССР). – № 3779860/24-07; заявл. 14.08.1984; опубл. 07.05.1986, Бюл. 17.
7. Маренич К.Н. Анализ факторов ограничения функции защиты человека от электропоражения в электрической сети участка шахты / К.Н. Маренич, А.И. Денисова // Горная промышленность, №4, 2023. – С. 54 - 58.
8. Маренич К.Н. Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов: монография / К.Н. Маренич. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 240 с.: ил., табл.
9. Three-phase Induction Motors / Catalog D84.1-2009. – Siemens AG, 2009. – 364 p.
10. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81Ю 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80 – [Вступил в силу 01.01.79]. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 13 с.