

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

---

ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО  
ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Аспирант В. С. ДЗЮБАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ШАХТНЫХ УЧАСТКОВЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И ИХ ВЛИЯНИЯ  
НА АППАРАТУРУ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧЕК

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ № 173 —  
ГОРНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк, 1968 год

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

---

ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО  
ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Аспирант В. С. ДЗЮБАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ШАХТНЫХ УЧАСТКОВЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И ИХ ВЛИЯНИЯ  
НА АППАРАТУРУ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧЕК

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ № 173 —  
ГОРНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк, 1968 год

Работа выполнена в Государственном институте по проектированию и исследованию взрывобезопасного электрооборудования «Гипронисэлектрошахт» и Донецком ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Научный руководитель доктор технических наук, профессор Лейбов Р. М.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор технических наук, профессор **Озерной М. И.**,  
кандидат технических наук **Колосюк В. П.**

Ведущее предприятие — Восточный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности «ВостНИИ».

Автореферат разослан « . . . » . . . . . 196 г.

Защита диссертации состоится « . . . » . . . . . 196 г.  
на заседании ученого совета горно-электромеханического факультета  
Донецкого политехнического института, г. Донецк-66, ул. Артема, 58.  
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь

доцент **С. Ф. ТРАВНИК**

## ВВЕДЕНИЕ

Грандиозная программа построения коммунизма в нашей стране, принятая XXIII съездом КПСС, предусматривает значительное увеличение объема валовой продукции промышленности и повышение производительности труда за счет электрификации, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов.

Непрерывно расширяющееся применение электроэнергии в угольных шахтах и рост рабочих напряжений, вызванный значительным увеличением мощности угледобывающих машин, остро ставят вопрос об обеспечении безопасности труда и бесперебойности электроснабжения участков угольных шахт. Однако обеспечение безопасности обслуживающего персонала и высокой надежности электроснабжения в угольных шахтах затрудняется тяжелыми условиями эксплуатации шахтного электрооборудования. Ограниченность рабочего пространства, слабая освещенность, значительная запыленность, передвижной характер работы основного электрооборудования и т. д. создают повышенную опасность поражения людей электрическим током, увеличивают вероятность возникновения пожаров, а на шахтах, опасных по газу или пыли, — взрывов рудничной атмосферы.

Предупреждение опасности поражения обслуживающего персонала электрическим током, а также снижение вероятности возникновения пожаров и взрывов рудничной атмосферы обеспечивается аппаратурой защиты от утечек тока. Вопросы, связанные с обеспечением безопасности шахтных участков электрических сетей с помощью аппаратуры защиты от утечек, рассмотрены в работах профессора Р. М. Лейбова,

профессора Л. В. Гладиллина, д. т. н. Н. Ф. Шишкина, к. т. н. Н. А. Кизимова, к. т. н. К. И. Москалец, к. т. н. Г. В. Миндели, к. т. н. А. Я. Фанина, к. т. н. Х. М. Желиховского, к. т. н. В. П. Колосюка, к. т. н. Д. Н. Степанчука и др.

Вместе с тем оказалось необходимым исследовать переходные процессы в шахтных электрических сетях и в аппаратуре защиты от утечек, так как, с одной стороны, переходные процессы приводят к увеличению длительности протекания токов утечек в шахтных участковых электрических сетях при их отключении аппаратурой защиты, а также к броскам тока в сопротивлениях утечек, значительно превышающим установившиеся значения этих токов, что существенно сказывается на электробезопасности указанных сетей. С другой стороны, переходные процессы в шахтных электрических сетях и в аппаратуре защиты от утечек могут вызвать ложные срабатывания последней и, таким образом, отключения электрических сетей, неоправданные по соображениям безопасности. Это приводит к значительным простоям электрооборудования и наносит большой ущерб народному хозяйству.

Поэтому создание средств защиты от утечек в шахтных участковых электрических сетях, обеспечивающих безопасность эксплуатации этих сетей и имеющих высокую устойчивость против ложных срабатываний, имеет большое народнохозяйственное значение.

Настоящая работа посвящена исследованию переходных процессов в шахтных участковых компенсированных электрических сетях и в аппаратуре защиты от утечек, влиянию этих процессов на работу аппаратуры, на требования, предъявляемые к ней, и на принципы конструирования этой аппаратуры, а также разработке на базе проведенных исследований аппаратов защиты от токов утечек с устройствами автоматической компенсации емкостной составляющей этих токов, обеспечивающих безопасность эксплуатации шахтных участковых электрических сетей и имеющих высокую устойчивость против ложных срабатываний.

Работа состоит из пяти глав, содержащих 229 страниц машинописного текста и 94 рисунка, и приложений, содержащих 31 страницу машинописного текста и 2 рисунка.

## ГЛАВА I

### ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК И БЕСПЕРЕБОЙНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЧАСТКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Для электрификации участков угольных шахт в СССР почти исключительное распространение получили трехфазные электрические сети переменного тока промышленной частоты с изолированной нейтралью трансформатора, как более безопасные, чем сети с заземленной нейтралью. Безопасность эксплуатации таких сетей определяется, как известно, величиной и длительностью протекания токов утечек.

На основе проведенных на людях и животных исследований американский ученый Дальзиель предложил формулу, связывающую безопасный для человека ток с временем его действия

$$I_{кб} = \frac{K}{\sqrt{t}}, \quad (a) \quad (1)$$

где  $I_{кб}$  — эффективное значение кратковременного безопасного тока через человека в амперах при его протекании в течение времени  $t$  секунд;

$K$  — постоянный коэффициент, называемый Дальзиелем величиной постоянной энергии.

Пользуясь этой формулой можно сделать вывод, что протекание тока через тело человека не вызовет опасных последствий в том случае, если энергия, обусловленная протеканием указанного тока, не будет превышать допустимой величины, равной

$$W_d = K^2 R = I^2 R t, \quad (2)$$

где  $R$  — сопротивление тела человека.

Таким образом, для обеспечения безопасности эксплуатации шахтных электрических сетей защита от утечек должна обеспечить, с одной стороны, непревышение длительным током утечки величины  $I_{дб}$  и непревышение энергией, поглощенной при электротравме, допустимой величины  $W_{д}$ , с другой стороны. При этом следует иметь в виду, что величина  $t$  определяется не только временем отключения сети аппаратурой защиты, но и временем снижения обратной э. д. с. присоединенных к сети вращающихся асинхронных электродвигателей. Объясняется это тем, что напряжение в сети не исчезает мгновенно после отключения ее от питающего трансформатора, а снижается в течение определенного времени, так как в обмотках роторов вращающихся асинхронных электродвигателей, присоединенных к сети, продолжают некоторое время протекать токи, которые стремятся поддержать их потоко-сцепление и, следовательно, напряжения на зажимах обмоток статоров электродвигателей неизменными. Исследования переходных процессов в сетях с подключенным вращающимся ненагруженным асинхронным электродвигателем показали, что постоянная времени снижения напряжения в сети после отключения ее от источника питания  $T_3$  может быть с достаточной точностью определена из следующего выражения:

$$T_3 \approx \frac{U_{\phi}}{I_0 r_3 \omega} K_{\mu}, \quad (3)$$

где  $U_{\phi}$  — фазное напряжение сети;  $I_0$  — ток холостого хода;  $\omega$  — угловая скорость ротора, близкая к круговой частоте сети;  $K_{\mu}$  — коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи электродвигателя и равный  $1,7 \div 2$  для комбайновых электродвигателей с водяным охлаждением и  $1,1 \div 1,2$  для комбайновых электродвигателей с воздушным охлаждением.

Как показывают расчеты и экспериментальные исследования, максимальные величины электромагнитных постоянных времени необдуваемых электродвигателей предельной мощности (имеющих наибольшую постоянную времени) с номинальным напряжением 380 и 660 в соответственно равны 1,33 и 1,55 сек.

В случае отключения сети с группой подключенных к ней электродвигателей постоянная времени снижения напряжения в сети может быть с достаточной для практических расчетов точностью определена из выражения

$$T_{\text{Эг}} \approx \frac{\sum_{k=1}^{k=n} P_{\text{ПК}}}{\sum_{k=1}^{k=n} \frac{P_{\text{ПК}}}{T_{\text{Эк}}}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{ПК}}$  — номинальная мощность  $k$ -го электродвигателя;  
 $T_{\text{Эк}}$  — электромагнитная постоянная времени  $k$ -го электродвигателя.

Из приведенных данных и формул (3) и (4) видно, что время снижения напряжения в шахтной участковой электрической сети ( $t \approx 3T_{\text{Эг}}$ ) до безопасной величины после отключения сети защитным аппаратом достигает 3 ÷ 4 сек.

Так как токи через человека, прикоснувшегося к фазе сети, могут достигать нескольких десятых долей ампера, а время протекания этих токов может составлять несколько секунд, безопасность эксплуатации шахтных участковых электрических сетей в ряде случаев не может быть обеспечена только отключением сети. В этих случаях кроме защитного отключения сетей необходимо принимать специальные меры по ограничению, по крайней мере, одной из двух указанных величин (кратковременного тока утечки или времени его протекания). Исследования показывают, что наиболее простым путем решения этой задачи, не требующим разработки специальной коммутационной аппаратуры и переделки схем электроснабжения участков угольных шахт, является снижение кратковременных токов путем компенсации их емкостной составляющей.

Преимуществом метода компенсации емкостной составляющей по сравнению с другими способами обеспечения безопасности является также и то, что компенсаторы обеспечивают снижение не только кратковременных, но и длительных токов утечек. Последнее позволяет снизить уставки аппаратов защиты от утечек и тем самым сократить количество отключений электрических сетей.

## ГЛАВА II

### ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ УТЕЧЕК ТОКА

Исследования показывают, что при применении идеально компенсатора (компенсатора без потерь) установившийся ток через сопротивление однофазной утечки (в частности, через человека) в сети с бесконечно большим сопротивлением изоляции определяется выражением



$$I_y = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2(C_c - C_n)^2}}} \quad (5)$$

где  $U$  — эффективное значение фазного напряжения сети;  
 $C_c$  — полная емкость сети относительно земли;  
 $C_n$  — емкость, на которую настроен компенсатор;  
 $R$  — сопротивление однофазной утечки.

В случае отсутствия в сети компенсатора ток через однофазную утечку равен

$$I_y = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C_c^2}}} \quad (6)$$

Из этих выражений видно, что зависимость тока через человека от емкости сети при наличии в сети компенсатора без потерь отличается от соответствующей зависимости при отсутствии компенсатора тем, что начало отсчета емкости сети в первом случае сдвинуто на величину емкости, на которую настроен компенсатор. Поэтому эффективное снижение емкостных токов утечек в шахтных участковых электрических сетях может быть обеспечено лишь применением устройств автоматической компенсации, настраивающихся на фактическую емкость сети, так как при этом соблюдается равенство  $C_c = C_n$ . В этом случае установившийся ток через однофазную утечку при применении компенсатора с индуктивным устройством присоединения к сети равен

$$I_y = \frac{U}{R + \frac{1}{\frac{1}{r_{из}} + g_n + r_m \omega^2 C_c^2}}, \quad (7)$$

а при применении компенсатора с емкостным устройством присоединения

$$I_y = \frac{U}{R + \frac{1}{\frac{1}{r_{из}} + g_n \left(1 + \frac{C_c}{C_\phi}\right)^2 + r_m \omega^2 C_c^2}}, \quad (8)$$

где  $r_{из}$  — сопротивление изоляции сети;  
 $g_n$  — проводимость, обусловленная потерями в стали дросселя;

$r_m$  — сопротивление обмоток компенсатора;  
 $C_\phi$  — емкость устройства присоединения.

Из этих выражений видно, что применение разделительных конденсаторов  $C_\phi$  или емкостных устройств присоединения в компенсаторах приводит при прочих равных условиях к увеличению установившегося (остаточного) тока утечки, причем влияние этих конденсаторов возрастает с увеличением емкости сети, т. е. тогда, когда особенно важно обеспечить высокую эффективность компенсатора.

Применение разделительного конденсатора в цепи компенсирующего дросселя или емкостного устройства присоединения компенсатора к сети, которое необходимо для предотвращения замыкания постоянного оперативного тока реле, утечки через цепи компенсатора, изменяет также характер переходного процесса. Свободная составляющая тока через однофазную утечку в этом случае равна

$$i_{cb} = \frac{U_m}{R} \left\{ \frac{a\sqrt{a^2 + \omega^2}}{(a-b)^2 + \omega_0^2} e^{-at} \sin(\varphi - \alpha_1) + \right. \\
+ \frac{e^{-bt}}{2\sqrt{\omega_0^2 + (a-b)^2}} \left[ \sqrt{\left[ \omega + \left( \omega_0 + \frac{b^2}{\omega_0} \right) \right]^2 + \left( b \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \times \right. \\
\times \sin(\omega_0 t + \varphi + \alpha_2 + \alpha_3) + \\
\left. \left. + \sqrt{\left[ \omega - \left( \omega_0 + \frac{b^2}{\omega_0} \right) \right]^2 + \left( b \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \sin(\omega_0 t - \varphi - \alpha_4 + \alpha_3) \right], \quad (9) \right.$$

где  $p_1 = -a$ ,  $p_{2,3} = -b \pm j\omega_0$  — корни характеристического уравнения

$$p^3 + \frac{1}{RC_c} p^2 + \omega^2 p + \frac{\omega^2}{R(C_\phi + C_c)} = 0; \\
\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\omega}{a}; \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{b \left( 2 + \frac{\omega}{\omega_0} \right)}{\omega + \omega_0 - \frac{b^2}{\omega_0}}; \operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{a-b}{\omega_0}; \\
\operatorname{tg} \alpha_4 = \frac{b \left( 2 - \frac{\omega}{\omega_0} \right)}{\omega - \omega_0 + \frac{b^2}{\omega_0}}. \quad (10)$$

Анализ зависимостей декрементов затухания  $a$  и  $b$  от емкости устройства присоединения (разделительного конденсатора)  $C_f$ , полученных на ЭЦВМ «Минск-1», показывает, что при применении компенсатора с емкостным устройством присоединения длительность переходного процесса, а, следовательно, и опасность прикосновения человека к фазе сети уменьшается с увеличением емкости  $C_f$  и стремится к длительности переходного процесса при применении компенсатора с индуктивным устройством присоединения.

При этом, как показывают расчеты, длительность переходного процесса не менее чем в два раза превышает длительность процесса при отсутствии в сети компенсатора.

Учитывая все вышеизложенное можно сделать вывод, что для увеличения эффективности компенсатора емкость устройств присоединения к сети или разделительных конденсаторов компенсирующих устройств необходимо выбирать по возможности большей. Расчеты показывают, что для того, чтобы длительность переходного процесса при возникновении однофазной утечки сопротивлением 1000 ом, имитирующем минимальное сопротивление человека, не превышала 0,025—0,03 секунды, полная емкость устройства присоединения компенсатора должна быть не менее 5—6 микрофарад.

Из приведенных цифр видно, что длительность переходного процесса при возникновении утечки значительно меньше времени снижения напряжения в сети. Поэтому устройства автоматической компенсации емкостной составляющей токов утечки, эффективно снижающие установившийся ток утечки, позволяют повысить безопасность эксплуатации шахтных участков электрических сетей. Однако, как видно из приведенных выражений, свободная составляющая тока через человека во время переходного процесса в сети может значительно превышать установившийся ток и, таким образом, оказывать влияние на электробезопасность. Это влияние очевидно, тем больше, чем выше напряжение сети и чем больше максимальная емкость ее относительно земли.

На базе аналитических выражений и зависимостей, полученных на ЭЦВМ «Минск-1», приведенных в I и II главе, в работе разработана методика расчета допустимого кратковременного тока утечки с учетом действия переходных процессов в сети при возникновении утечек и отключении вращающихся электродвигателей. Эта методика основана на определении энергии, поглощенной в теле человека при протекании через него отдельных составляющих тока, и сравнении ее с допустимой энергией, определенной из (2). Величина постоянной

энергии К, численно совпадающая с допустимым для человека током, протекающим в течение 1 сек, была принята при расчетах равной 0,065.

### ГЛАВА III

#### ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ШАХТНЫХ УЧАСТКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРИ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Как показали исследования, одной из основных причин ложных срабатываний аппаратуры защиты от утечек является возникновение напряжения между нейтралью сети и землей при переходных процессах, связанных с отключением контактором электродвигателя дуга сначала гаснет в одной фазе, а затем примерно через четверть периода промышленной частоты, т. е. через 5 мсек, в двух других фазах. В результате разрыва дуги в одной из фаз трехфазная система токов превращается в двухфазную и в сети возникает переходный процесс.

Приняв мощность питающего трансформатора и сопротивление изоляции сети равными бесконечности для промежутка времени от момента погасания дуги на контактах контактора в одной фазе до полного отключения электродвигателя можно записать

$$u_0 = -E_m \frac{1}{2 \left(1 + \frac{C_1}{C'}\right)} \left[ \sin(\omega t + \varphi) - \sin \varphi e^{-\frac{\omega t}{2 \operatorname{tg} \varphi}} \cos \omega_0 t \right], \quad (11)$$

где  $u_0$  — напряжение между нейтралью сети и землей;  
 $C_1$  — емкость неотключаемой контактором части сети;  
 $C'$  — емкость отключаемой контактором части сети;

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{r};$$

$r, L$  — соответственно активное сопротивление и индуктивность фазы обмотки статора электродвигателя;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2C}{LC'(2C + C_1)}} \text{ — круговая частота свободной составляющей напряжения } u_0;$$

$C = C_1 + C'$  — полная емкость фазы сети относительно земли.

Из выражения (11) видно, что напряжение  $u_0$ , появляющееся при отключении электродвигателя от сети, определяется соотношением между емкостями неотключаемой и отключаемой частей сети и углом сдвига тока в фазе электродвигателя по отношению к приложенному напряжению, т. е. соотношением между индуктивным и активным сопротивлениями электродвигателя. Это напряжение не зависит от абсолютных величин емкостей сети и сопротивлений электродвигателя.

Так как ложные срабатывания аппаратов защиты от утечек вызываются разрядом емкостей неотключенной части сети, заряженных до величин остаточного напряжения  $u_{ост}$ , через измерительные цепи аппарата, вероятность ложного срабатывания аппарата, очевидно, будет тем выше, чем больше величина  $u_{ост}$ . Исследования показывают, что это напряжение, равное напряжению  $u_0$  в момент погасания дуги во всех трех фазах, может существенно изменяться при одних и тех же параметрах сети, так как имеющие место в реальных условиях изменения интервала времени от момента логасания дуги в одной фазе до полного отключения электродвигателя приводят к значительному изменению свободной составляющей напряжения  $u_0$ , частота которой  $\omega_0$  весьма велика. Расчеты максимально возможных величин  $u_{ост \max}$  показывают, что при отсутствии утечек это напряжение может достигать (0,74—0,75) эффективного значения фазного напряжения сети.

В главе рассмотрены также переходные процессы в шахтных электрических сетях при отключении электродвигателей в случаях наличия низкого сопротивления изоляции и утечек в различных фазах сети до и после контактов контактора, а также определено влияние параметров питающего трансформатора на переходный процесс. Установлено, что при наличии утечек в сети величина  $u_{ост \max}$  изменяется в пределах 0,72—0,82) эффективного напряжения сети, т. е. влияние утечек в сети на величину  $u_{ост \max}$  невелико.

Полученные величины  $u_{ост \max}$  позволяют упростить испытания и производить расчеты аппаратов защиты от утечек на отсутствие ложных срабатываний при отключении электродвигателей. В настоящее время при указанных испытаниях проводится большое количество (не менее 100) включений и отключений ответвления сети с подключенным электродвигателем максимальной мощности для получения напряжения  $u_{ост}$ , близкого к  $u_{ост \max}$  при принятых параметрах сети. Однако уверенности в том, что такое напряжение при испытаниях было получено хотя бы в одном из опытов нет. Нетрудно видеть, что испытания будут значительно проще, а результаты более

достоверны, если к сети с испытываемым аппаратом защиты подключать емкости, предварительно заряженные до напряжения.

$$u_c = u_{\text{ост max}} - u_{\text{опер}}, \quad (12)$$

где  $u_{\text{опер}}$  — оперативное напряжение аппарата защиты от утечек.

## ГЛАВА IV.

### ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ АППАРАТУРЫ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧЕК

Исследования, проведенные в данной главе, показывают, что переходные процессы в цепях реле утечки, работающих в комплексе с устройствами компенсации емкостной составляющей токов утечек, существенно отличаются от процессов при отсутствии компенсаторов. В отличие от случаев, когда компенсатор отсутствует, при разряде емкостей сети через цепи аппаратов защиты с компенсаторами или при включении частей сети с большой емкостью относительно земли переходный процесс всегда имеет колебательный характер. Так, при разряде емкостей неотключенной части сети, заряженных до напряжения  $u_c$ , через цепи аппарата защиты от утечек, выполненного по схеме реле утечки РУВ-2-660, ток в обмотке реле изменяется по закону

$$i = \frac{u_{\text{ост}}}{rL_1C_{\text{ш}}} \left[ \frac{1}{(a-b)^2 + \omega_0^2} e^{-bt} + \frac{1}{\omega_0 \sqrt{(b-a)^2 + \omega_0^2}} e^{-at} \sin(\omega_0 t - \lambda) \right] \quad (13)$$

где  $C_{\text{ш}} = C_1 + C$

$C_1$  — емкость конденсатора присоединения компенсирующего дросселя к земле;

$C$  — емкость конденсатора, шунтирующего обмотку реле;

$r$  — активное сопротивление обмотки реле;

—  $b$ ; —  $a \pm j\omega_0$  — корни характеристического уравнения

$$p^3 + \left( \frac{r_1}{L_1} + \frac{1}{rC_{\text{ш}}} \right) p^2 + \left( \frac{1}{L_1 C_c} + \frac{r+r_1}{rL_1 C_{\text{ш}}} \right) p + \frac{1}{rL_1 C_{\text{ш}} C_c} = 0; \quad (14)$$

$r_1, L_1$  — активное сопротивление и индуктивность компенсирующего дросселя;

$C_c$  — емкость неотключенной части сети;

$$\lambda = \arctg \frac{\omega_0}{b - a} .$$

Ранее указывалось, что с уменьшением емкости неотключенной части сети остаточное напряжение на ней после отключения электродвигателя  $U_{ост}$  увеличивается при прочих равных условиях. Это означает, что в случае применения практически безынерционных аппаратов защиты от утечек вероятность их срабатывания при отключении электродвигателей увеличивается с уменьшением емкости неотключенной части сети. Однако с увеличением времени срабатывания аппарата (например, при увеличении емкостей  $C$  или  $C_1$ ) эта зависимость приобретает более сложный характер.

Объясняется это тем, что одновременно с увеличением напряжения  $u_{ост}$  при уменьшении емкости неотключенной части сети снижается величина отношения максимального значения тока в реле к  $u_{ост}$  и длительность разряда емкости. Подставив в выражение (13) ряд значений емкостей сети  $C_c$ , можно убедиться, что в определенном диапазоне увеличение емкости неотключенной части сети  $C_c$  приводит к повышению максимального тока в измерительном элементе  $i_{max}$ . Однако при дальнейшем увеличении  $C_c$   $i_{max}$  будет снижаться. Очевидно, в предельном случае, когда  $C_c = 0$ ,  $u_{ост}$  согласно (11) равно нулю и, следовательно,  $i_{max} = 0$ . Таким образом, функция  $i_{max} = f(C_c)$  имеет вид выпуклой кривой. Из выражения (13) видно, что с уменьшением емкости  $C_c$ , шунтирующей обмотку реле, т. е. с увеличением быстродействия аппарата, точка экстремума функции  $i_{max} = f(C_c)$  смещается в сторону меньших значений емкостей неотключенной части сети. Одновременно с этим растет и абсолютная величина экстремального значения тока  $i_{max}$ , т. е. увеличивается вероятность ложных срабатываний аппарата.

Из вышесказанного видно, что испытания на устойчивость аппаратов против ложных срабатываний, вызванных переходными процессами при отключении электродвигателей, необходимо проводить не только при предельных, но и при промежуточных значениях емкостей неотключаемой и отключаемой контактором частей сети.

Исследования переходных процессов в различных схемах реле утечки, проведенные в данной главе, показывают, что при подключении части сети с емкостью  $C_c$  ток, протекающий че-

рез обмотку реле, определяется в зависимости от схемы аппарата и сопротивления изоляции сети теми же выражениями, что и при разряде емкостей сети. Однако в связи с тем, что заряд на емкостях в момент их подключения равен нулю, вместо  $U_{ост}$  в указанные выражения входит значение э. д. с. Е источника оперативного тока аппарата. Из этого можно сделать вывод, что при  $E < U_{ост\ max}$  более тяжелым с точки зрения обеспечения устойчивости аппарата против ложных срабатываний оказывается режим отключения электродвигателя, а не включения ответвлений сети с большой емкостью. При э. д. с. же источника оперативного тока аппарата, превышающей максимально возможную величину остаточного напряжения  $U_{ост\ max}$ , более тяжелым является режим подключения к сети ответвления с большой емкостью. Поэтому схемы с питанием через вентили от сети (например, схемы ЗВ), при применении которых всегда справедливо неравенство  $E > U_{ост\ max}$ , малочувствительны к действию переходных процессов, возникающих при отключении электродвигателей. Для этих схем более тяжелыми являются режимы включения ответвлений защищаемой сети, имеющих большую емкость относительно земли.

Ток в обмотке реле схемы ЗВ с компенсатором, присоединенным к реле утечки по такой же схеме, как в аппаратуре УАКИ, может быть определен из следующего выражения:

$$i = \frac{E}{r_1 r_2 C_2} \left\{ \frac{d^2 - ad + \beta}{(c-d)[(a-d)^2 + b^2]} e^{-dt} + \frac{c^2 - ac + \beta}{(d-c)[(a-c)^2 + b^2]} e^{-ct} + \frac{1}{b} \sqrt{\frac{(a^2 - b^2 - \alpha a + \beta)^2 + b^2(\alpha - 2a)^2}{[(c-a)^2 + b^2][(d-a)^2 + b^2]}} e^{-at} \sin(bt + \lambda) \right\}, \quad (15)$$

где

$$\lambda = \arctg \frac{b(\alpha - 2a)}{a^2 - b^2 - \alpha a + \beta} - \arctg \frac{b}{d-a} - \arctg \frac{b}{c-a};$$

$r_1$  — сопротивление обмотки реле;  $r_2$  — токоограничивающее сопротивление схемы;  $C_2$  — емкость конденсатора, шунтирующего обмотку реле;  $-d, -c, -a \pm jb$  — корни характеристического уравнения

$$p^4 + b^1 p^3 + c^1 p^2 + d^1 p + e^1 = 0;$$

$$\alpha = \delta_4 + \delta_5; \quad \beta = \omega_2^2; \quad b^1 = \delta_{x1} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4;$$

$$c^1 = \omega_1^2 r_{дп} g_{x1} + \delta_2 \delta_3 + \omega_2^2 + \omega_3^2 r_{дп} g_{x2}; \quad d^1 = \omega_2^2 \delta_{x2} + \omega_3^2 \delta_2 r_{дп} g_{x2};$$



$$e^1 = \omega_2^2 \delta_2 \delta_3; \quad \delta_1 = \frac{1}{r_2 C_2}; \quad \delta_2 = \frac{1}{r_1 C_2}; \quad \delta_3 = \frac{1}{r_2 C_c}; \quad \delta_4 = \frac{r_{др}}{L_{др}};$$

$$\delta_5 = \frac{r_2}{L_{др}}; \quad \delta_{\Sigma 2} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3; \quad \omega_1^2 = \frac{1}{L_{др} C_2}; \quad \omega_2^2 = \frac{1}{L_{др} C_1};$$

$$\omega_3^2 = \frac{1}{L_{др} C_c}; \quad g_{\Sigma 1} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_{др}}; \quad g_{\Sigma 2} = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_{др}};$$

$C_1$  — емкость устройства присоединения компенсатора к сети;

$r_{др}$ ,  $L_{др}$  — активное сопротивление и индуктивность компенсирующего дросселя.

Расчеты показывают, что уже при емкости включаемого ответвления сети, равной 0,3—0,4 микрофарады на фазу, максимальное значение тока в обмотке реле при реальных параметрах аппаратов защиты, основанных на схемах с питанием через вентили непосредственно от сети, может значительно превосходить ток его срабатывания. Это может привести к срабатыванию аппарата при включении такого ответвления даже при бесконечно большом сопротивлении изоляции сети.

Подставив в выражение (15) значение  $r_{др} = \infty$ , можно убедиться, что при обрыве обмотки компенсирующего дросселя, т. е. при отсутствии компенсатора, бросок тока в реле в рассматриваемом режиме резко снижается. Таким образом, присоединение компенсатора к реле утечки существенно снижает устойчивость аппарата против ложных срабатываний. Это объясняется разрядом конденсаторов устройства присоединения или разделительных конденсаторов компенсирующего устройства, заряженных оперативным напряжением реле утечки, через обмотку измерительного реле. Разряд этих конденсаторов приводит, как показывают исследования, также к срабатыванию аппарата защиты при возникновении утечек, сопротивление которых превышает уставку аппарата. Поэтому для повышения устойчивости аппарата защиты против ложных срабатываний необходимо принимать специальные меры, препятствующие разряду разделительных конденсаторов через измерительные реле этих аппаратов.

Исходя из всего вышеизложенного, можно объяснить различную устойчивость против ложных срабатываний аппаратов защиты от утечек, работающих в разных бассейнах страны. В тех бассейнах, участковые сети шахт которых имеют относительно небольшие емкости и питают мощные врубово-комбай-

новые электродвигатели (например, большинство сетей Донбасса), наиболее тяжелым является режим отключения электродвигателя. В этом режиме аппараты, основанные на схемах с питанием через вентили от сети, работают устойчиво, а для аппаратов с посторонним источником питания, имеющих относительно низкое оперативное напряжение, это один из наиболее тяжелых режимов. В сетях же с большими длинами ответвлений, с питанием нескольких участков от одного трансформатора и т. д., имеющих значительные емкости относительно земли и питающих токоприемники небольшой мощности, к которым относится, например, большое количество участковых электрических сетей шахт Кузбасса, превалирующим, очевидно, будет режим включения ответвлений с большой емкостью. В этих условиях, аппараты с посторонним источником питания оказываются достаточно устойчивыми против ложных срабатываний, в то время как для аппаратов, основанных на схемах с питанием через вентили непосредственно от сети, этот режим является одним из наиболее тяжелых.

В главе рассмотрены также работа аппаратов защиты от токов утечек с устройствами компенсации их емкостной составляющей при возникновении глухого замыкания между фазами и землей, а также феррорезонансные явления в цепях этих аппаратов.

## ГЛАВА V

### РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧЕК В ШАХТНЫХ УЧАТКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Результаты выполненных в предыдущих главах исследований легли в основу разработки аппаратов защиты от токов утечек с устройствами автоматической компенсации их емкостной составляющей типов АЗАК-380 и АЗАК-660. Аппараты состоят из блоков реле утечки, схемы которых выполнены на базе серийно выпускаемых Днепропетровским и Прокопьевским заводами шахтной автоматики реле утечки типов УАКИ-380 и УАКИ-660, и блоков устройств автоматической компенсации емкостной составляющей токов утечек. Для повышения устойчивости аппаратов против ложных срабатываний в них применены специальные устройства присоединения компенсаторов к реле утечки, снижающие ток разряда разделительных конденсаторов устройств компенсации через измерительные реле. С этой целью в аппарате АЗАК-380 между из-

мерительным реле и шунтирующим его обмотку конденсатором установлен диод  $D_1$  таким образом, что он препятствует разряду конденсаторов устройства присоединения компенсатора к сети.

В схеме аппарата защиты АЗАК-660 для повышения устойчивости его против ложных срабатываний между точкой присоединения компенсирующего дросселя к разделительному конденсатору и заземляющим зажимом присоединен дополнительный конденсатор  $C$ .

Анализ выражений для определения тока в обмотке реле при применении таких схем показывает, что с увеличением сопротивления  $r$ , шунтирующего диод  $D_1$ , или емкости  $C$  бросок тока в обмотке реле при переходных процессах снижается. Поэтому выбором величин сопротивления  $r$  или емкости  $C$  можно обеспечить минимальный бросок тока в обмотке реле при возникновении утечек, больших уставки, или включении ответвления с большой емкостью и, следовательно, обеспечить устойчивость аппарата против ложных срабатываний в этих режимах.

Устройства автоматической компенсации аппаратов АЗАК состоят из компенсирующих дросселей, устройств присоединения этих дросселей к сети и схемы автоматической настройки компенсирующих дросселей на емкость сети. Измерение емкости сети производится генератором типа  $LC$ , имеющим оперативную частоту 2000 герц. В цепь обратной связи этого генератора с помощью разделительных конденсаторов включена измеряемая емкость сети. Поэтому напряжение на выходе генератора пропорционально емкости сети. Это напряжение усиливается с помощью двухкаскадного усилителя на транзисторах и подается на обмотку управления компенсирующего дросселя, устанавливая требуемую индуктивность последнего.

Опытные образцы аппаратов защиты типов АЗАК-380 и АЗАК-660 прошли лабораторные испытания в институтах «Гипронисэлектрошахт» и МакНИИ, а также промышленные испытания на шахтах «Октябрьская», треста «Куйбышевуголь», комбината «Донецкуголь» и № 27, треста «Снежинантрацит», комбината «Артемуголь».

Испытания показали, что аппараты АЗАК обеспечивают эффективное снижение емкостных токов утечек. Ток через однофазную утечку сопротивлением 1000 ом при изменении емкости сети от 0 до 1 мкф на фазу и  $r_{из} = \infty$  в случае применения аппаратов АЗАК не превышает 66 ма в сетях с линейным напряжением 380 и 76 ма — в сетях 660 в, в то время как при применении аппаратов защиты УАКИ со статическими

компенсаторами эти токи достигают соответственно 93 и 150 ма. При отсутствии в сети компенсаторов емкостных токов утечек указанные выше токи соответственно равны 151 и 263 ма. Уставки отключающих сопротивлений аппаратов защиты АЗАК-380 при внезапном снижении сопротивления изоляции сети не более, чем на 20% превышают уставки при плавном снижении сопротивления изоляции и практически совпадают в аппаратах АЗАК-660. Аппараты АЗАК устойчиво работают при включениях и отключениях ответвлений сети, имеющих емкость до 1 мкф на фазу. Это обеспечивает высокую устойчивость аппаратов против ложных срабатываний. За период длительных шахтных испытаний аппаратов АЗАК неоправданных отключений защищаемых электрических сетей не наблюдалось.

По положительным результатам испытаний опытные образцы аппаратов АЗАК были приняты Межведомственной комиссией, организованной Министерством электротехнической промышленности СССР, и рекомендованы для освоения их промышленного производства на Прокопьевском заводе шахтной автоматики. В настоящее время Прокопьевский завод шахтной автоматики приступил к освоению производства аппаратов защиты типа АЗАК.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в работе исследования переходных процессов в шахтных участковых электрических сетях и в аппаратуре защиты от токов утечек с устройствами компенсации их емкостной составляющей позволили выяснить характер этих процессов и дать количественную оценку токов и напряжений в цепях аппаратуры защиты и сопротивлениях утечек при переходных процессах, вызванных возникновением утечек и коммутацией ответвлений электрических сетей с подключенными к ним электродвигателями.

Выяснено, что указанные переходные процессы могут оказывать существенное влияние на безопасность эксплуатации шахтных участковых электрических сетей и на работу аппаратуры защиты от утечек в этих сетях. Установлено, что в результате действия этих процессов, применяемые в настоящее время реле утечки со статическими компенсаторами емкостных токов утечек не обеспечивают в ряде случаев безопасность эксплуатации шахтных электрических сетей.

На базе проведенных исследований разработана методика расчета допустимого кратковременного тока утечки, необходимого для определения требуемой эффективности устройств автоматической компенсации емкостной составляющей токов утечки.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований выяснены основные причины ложных срабатываний аппаратуры защиты от утечек и разработаны мероприятия по повышению устойчивости этой аппаратуры против ложных срабатываний.

Разработаны и обоснованы эквивалентные схемы и методика расчета аппаратов защиты от утечек с компенсаторами емкостных токов утечек, значительно упрощающие определение токов в цепях этих аппаратов как в установившемся, так и в переходных режимах.

На основе проведенных исследований разработаны аппараты защиты от токов утечек с устройствами автоматической компенсации их емкостной составляющей типов АЗАК-380 и АЗАК-660. Применение этих аппаратов позволит обеспечить безопасность эксплуатации шахтных участковых электрических сетей и сократить простой участков шахт в результате снижения количества неоправданных отключений сетей аппаратурой защиты.

В настоящее время Прокопьевский завод шахтной автоматики приступил к освоению производства аппаратов АЗАК.

Выводы и рекомендации работы были также учтены МакНИИ при разработке технических требований к устройствам автоматической компенсации емкостной составляющей токов утечек, утвержденных Министерством угольной промышленности СССР.

Результаты работы докладывались:

1. На конференции молодых ученых по безопасности труда в угольной промышленности, г. Макеевка, 1965 г.

2. На научно-техническом совещании по вопросам разработки, проектирования и эксплуатации устройств компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях, г. Киев, 1966 г.

3. На третьем Всесоюзном совещании по взрывозащищенному электрооборудованию, г. Донецк, 1967 г.

4. На Республиканской конференции молодых ученых, посвященной проблемам безопасности труда в горной промышленности, г. Макеевка, 1968 г.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В. С. Дзюбан. Эквивалентные схемы для определения токов утечки в шахтных электрических сетях. Сборник «**Взрывобезопасное электрооборудование**», вып. IV, изд. «Энергия», 1966.

2. В. С. Дзюбан. Влияние схем и параметров элементов устройств компенсации емкостной составляющей тока утечки на ток утечки в сетях с незаземленной нейтралью трансформатора. Сборник «**Взрывобезопасное электрооборудование**», вып. IV, изд. «Энергия», 1966.

3. В. С. Дзюбан. О влиянии переходных процессов в шахтных электрических сетях на работу устройств защиты от утечек. Сборник «**Взрывобезопасное электрооборудование**», вып. V, изд. «Энергия», 1967.

4. В. С. Дзюбан, Х. М. Желиховский. Влияние устройств компенсации емкости на работу вентильных схем аппаратов защиты от утечек. Сборник «**Взрывобезопасное электрооборудование**», вып. V, изд. «Энергия», 1967.

5. В. С. Дзюбан, В. П. Кононенко. Влияние переходных процессов в шахтных участковых электрических сетях на действие защиты от утечек тока на землю. Тезисы докладов на **Республиканской конференции молодых ученых, посвященных проблемам безопасности труда в горной промышленности**, г. Макеевка, 1968.

6. В. П. Кононенко, В. С. Дзюбан. Влияние схем шахтного привода постоянного тока на защиту от утечек тока на землю. Тезисы докладов на **Республиканской конференции молодых ученых, посвященной проблемам безопасности труда в горной промышленности**, г. Макеевка, 1968.

7. В. С. Дзюбан, Я. С. Рюман. Устройство для компенсации емкостных токов в шахтных сетях, опасных по газу и пыли. Авторское свидетельство № 213171, кл. 21 d<sup>2</sup> 42/03. Бюллетень изобретений № 10, 1968.

Ответственный за выпуск — профессор Р. М. ЛЕЙБОВ

БП 27529. Подписано к печати 17.7.68 г. Формат бумаги 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печ. л. 1,5. Бум. л. 0,75. Зак. 151. Тираж 170 экз.

---

Газетное издательство и типография Донецкого обкома КП Украины,  
г. Донецк, ул. газеты «Социалистический Донбасс», 26.