

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР**
**ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи

Инж. И. Т. СИДОРЕНКО

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЗАЩИТЫ
РУДНИЧНЫХ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ
И ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ОТ ТОКОВ
ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ И ПЕРЕГРУЗОВ**

Специальность № 173 «Горная электромеханика»

**Автореферат
диссертации, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

г. Донецк — 1969 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Инж. И. Т. СИДОРЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЗАЩИТЫ
РУДНИЧНЫХ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ
И ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ОТ ТОКОВ
ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ И ПЕРЕГРУЗОВ

Специальность № 173 «Горная электромеханика»

Автореферат
диссертации, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Донецк — 1969 г.

Работа выполнена на кафедре «Горная электротехника и автоматика» Донецкого ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

Экспериментальная часть работы выполнена в лаборатории «Электровозная тяга» Донецкого политехнического института, на Макиевском экспериментальном заводе и на шахтах комбината «Донецкуголь».

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

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Заслуженный деятель науки и техники УССР, доктор технических наук, профессор ДГИ С. А. Волотковский.

Кандидат технических наук, начальник лаборатории МакНИИ И. Ф. Сумин.

Ведущее предприятие — научно-исследовательский институт ДонУГИ.

Защита состоится на заседании Ученого совета горноэлектромеханического факультета Донецкого политехнического института 28 марта 1969 г.

Ваши отзывы на автореферат просим направлять в двух экземплярах по адресу: г. Донецк-66, ул. Артема, 58, ДПИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Дата отправки автореферата « » 1969 г.

Ученый секретарь совета ДПИ
доцент, канд. техн. наук

А. Г. Гудзь.

ВВЕДЕНИЕ

В шахтных условиях, когда целесообразно применение локомотивного транспорта, откатка грузов контактными электровозами дешевле, чем рудничными локомотивами других видов. Поэтому во всех шахтах с малой опасностью пылегазовой среды применяются контактные электровозы.

Однако наличие в выработке, где работают контактные электровозы, неизолированных проводников тяговой сети (контактного провода и соединенного с землей рельсового пути) приводит часто к возникновению коротких замыканий и утечек тока, способных вызвать пожар или вывести из строя электрооборудование сети и подстанции. На ликвидацию подобных аварий затрачиваются дополнительные материальные средства и время, в течение которого простаивают электровозы, добычные участки, а иногда и вся шахта.

В реферируемой работе исследованы причины возникновения пожаров и повреждения электрооборудования в тяговых сетях и подстанциях, указаны мероприятия по их предотвращению и предложена аппаратура защиты тяговых сетей от токов замыкания на землю, опасных в пожарном отношении, и тяговых выпрямителей — от повреждения.

Работа изложена на 254 страницах текста, иллюстрируется 96 рисунками и сопровождается 16 таблицами. Результаты экспериментальных исследований и материалы испытания разработанной аппаратуры представлены в приложениях на 67 страницах текста и иллюстрированы четырьмя рисунками.

Глава I. СУЩЕСТВУЮЩИЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ РУДНИЧНЫХ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ И ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В области защиты рудничных тяговых сетей от токов утечки, опасных в отношении поражения людей, в пос-

ледние годы выполнен ряд научных исследований и работ. Проф. д. т. н. Р. М. Лейбов и доц. к. т. н. В. И. Дремов создали реле утечки РУКС-2М, д. т. н. В. А. Бунько, к. т. н. В. Л. Кожевников и другие разработали реле утечки РКС-2 и т. д. Реле утечки в значительной степени повышают безопасность эксплуатации шахтных контактных сетей, но они не могут быть использованы для защиты сетей и выпрямителей от больших токов короткого замыкания и перегрузов.

Вопросы расчета токов к. з. в тяговых сетях и различные решения по защите сетей и выпрямителей были рассмотрены в работах проф. д. т. н. С. А. Вологовского, д. т. н. В. А. Бунько, к. т. н. И. Ф. Сумина, к. т. н. В. Д. Фурсова, к. т. н. Г. Г. Пивняка, к. т. н. В. К. Пироженко и других. Однако ряд вопросов, связанных с защитой сетей и выпрямителей от токов замыкания на землю и перегрузов, все же или не решен или решен недостаточно полно.

Так, до последнего времени не были научно обоснованы требования к токовременным характеристикам защиты сетей и выпрямителей и к защитным аппаратам в целом. Общепринятая методика расчета токов короткого замыкания в тяговых сетях и подстанциях не учитывала ряд особенностей цепи к. з. подземных установок. Не была разработана специальная быстродействующая защитная аппаратура в рудничном исполнении, предотвращающая возникновение пожаров в тяговых сетях и повреждение выпрямителей.

На шахтах в цепях постоянного тока применялись фидерные выключатели переменного тока типа АФВ или ручные электровозные выключатели типа АВ-1Б (АВ-2Б), которые имели недостаточную коммутационную способность и часто выходили из строя при отключении больших токов к. з. в выпрямителях.

Из-за отсутствия специальной быстродействующей защиты, реагирующей как на большие токи к. з., так и на малые токи замыкания на землю, опасные в пожарном отношении, в последние годы сравнительно часто отмечались повреждения тяговых выпрямителей и пожары в тяговых сетях.

Целью диссертационной работы является теоретиче-

ское и экспериментальное исследование аварийных токов в подземных тяговых подстанциях и сетях, научное обоснование технических требований к защите тяговых сетей и выпрямителей и разработка аппаратуры защиты сетей и выпрямителей.

Глава II. ТОКИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В РУДНИЧНЫХ ТЯГОВЫХ СЕТЯХ И АВАРИЙНЫЕ ТОКИ В ВЫПРЯМИТЕЛЯХ

Обычно при расчете токов к. з. тяговых сетей не учитывалось шунтирующее влияние земли на величину сопротивления рельсового пути, нелинейность сопротивления выпрямительных установок, а в месте к. з. принималось падение напряжения в электрической дуге, равное 80—100 в. Это вносило серьезную погрешность в результаты расчета токов к. з.

При исследовании шунтирующего влияния земли на величину сопротивления рельсового пути нашими измерениями установлено, что «земля» уменьшает общее сопротивление рельсового пути как обратного провода тяговой сети более чем в 5—10 раз.

В известных методиках расчета шунтирующего влияния земли на величину сопротивления рельсового пути железнодорожного транспорта предусматривается или бесконечная протяженность рельсовых путей по обе стороны от тяговой подстанции (по К. Г. Марквардту), или равномерно распределенная электровозная нагрузка по длине рельсового пути (по Е. В. Чеботареву).

Шахтная же тяговая сеть имеет сравнительно небольшую длину с сосредоточенной нагрузкой, почему указанные методы расчета неприемлемы.

В данной работе теоретически получена следующая зависимость сопротивления рельсового пути (с учетом шунтирующего влияния земли) R_p от различных параметров рельсовой цепи:

$$R_p = m \frac{2th \frac{kl}{2} + thkl_2 + thkl_3}{\frac{thkl_2 + thkl_3}{thkl} + thkl_2 thkl_3 + 1}, \quad (II.30)$$

где $m = \sqrt{r_p r_n}$, $k = \sqrt{\frac{r_p}{r_n}}$,

r_p — сопротивление 1 км двух рельсовых ниток с учетом стыков, Ом/км;

r_n — переходное сопротивление между 1 км рельсового пути и землей с учетом сопротивления земли, Ом · км;

l — расстояние между подстанцией и местом короткого замыкания, км;

l_2, l_3 — длины участков рельсового пути по обе стороны от тяговой подстанции и места к. з., км.

При подстановке в уравнение (II. 30) бесконечно больших длин ($l = l_2 = l_3 = \infty$), получим $R_p = m$, что совпадает с выводом К. Г. Марквардта.

В соответствии с выражением (II. 30) при увеличении l значение R_p вначале растет, затем при l более 1,0÷1,5 км остается практически неизменным, а в конце выработки снова возрастает. Такой же характер зависимости R_p от l был установлен экспериментально при осциллографировании токов к. з. вдоль тяговой сети. Вычисленное по (II. 30) сопротивление отличается от обычно принимаемого в расчетах (не учитывающих шунтирующего влияния земли и сопротивления стыков) в 5—8 раз.

В общепринятых методиках расчета токов к. з. в рудничных тяговых подстанциях и сетях внешняя вольтамперная характеристика выпрямителя принимается линейной, а его внутреннее сопротивление r_B — постоянным, не зависящим от величины тока. В данной работе теоретически и экспериментально установлено, что величина r_B значительно изменяется при увеличении выпрямленного тока.

В шахтах наиболее распространены тяговые выпрямители с трансформаторами, соединенными по схеме трехфазного зигзага. Электромагнитные процессы в подобных установках наиболее полно рассмотрели А. М. Утевский и В. Н. Бако. Но они пренебрегли прямым падением напряжения на вентиле, активным сопротивлением обмоток трансформатора и ввели в цепь по-

стоянного тока бесконечно большую индуктивность, идеально сгладившую выпрямленный ток. Поэтому внешняя характеристика выпрямителя оказалась также линейной.

В данном исследовании учтены прямое падение напряжения на вентиле, активные и индуктивные сопротивления обмоток трансформаторов при чисто активном сопротивлении нагрузки выпрямителя, изменяющемся от ∞ до 0. Для описания электромагнитных процессов в рассматриваемом выпрямителе выведены уравнения:

$$\begin{aligned}
 e_1 &= \left(2 \frac{L_{1T}}{k^2} + 2L_{2T} \right) \frac{di_1}{dt} - \frac{L_{1T}}{k^2} \frac{d}{dt} (i_2 + i_3) + \\
 &+ \left(2 \frac{r_{1T}}{k^2} + 2r_{2T} + r_A \right) i_1 - \frac{r_{1T}}{k^2} (i_2 + i_3) + Ri + U_A; \\
 e_2 &= \left(2 \frac{L_{1T}}{k^2} + 2L_{2T} \right) \frac{di_2}{dt} - \frac{L_{1T}}{k^2} \frac{d}{dt} (i_1 + i_3) + \\
 &+ \left(2 \frac{r_{1T}}{k^2} + 2r_{2T} + r_A \right) i_2 - \frac{r_{1T}}{k^2} (i_1 + i_3) + Ri + U_A; \quad (\text{II. 48}) \\
 e_3 &= \left(2 \frac{L_{1T}}{k^2} + 2L_{2T} \right) \frac{di_3}{dt} - \frac{L_{1T}}{k^2} \frac{d}{dt} (i_1 + i_2) + \\
 &+ \left(2 \frac{r_{1T}}{k^2} + 2r_{2T} + r_A \right) i_3 - \frac{r_{1T}}{k^2} (i_1 + i_2) + Ri + U_A,
 \end{aligned}$$

где e_1, e_2, e_3 — э. д. с. между анодами и нулевым выводом трансформатора;

i_1, i_2, i_3 — токи анодов;

$r_{1T}, r_{2T}, L_{1T}, L_{2T}$ — активные сопротивления и индуктивности первичных и вторичных обмоток трансформатора;

k — коэффициент трансформации;

U_A, r_A — начальное прямое падение напряжения на вентиле и динамическое сопротивление вентиля;

i — выпрямленный ток.

Из уравнений (II. 48) найдены мгновенные значения выпрямленного тока для трех режимов работы вентиля:

а) при отсутствии коммутации

$$i' = \frac{E_{2m}}{Z_1} \cos\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3} - \varphi_1\right) - \frac{U_1}{r_1} + \left[i_0 + \frac{U_1}{r_1} - \frac{E_{2m}}{Z_1} \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3} - \varphi_1\right) \right] e^{-\frac{\omega t}{Tg\varphi_1}}; \quad (II. 56)$$

б) при коммутации двух анодов выпрямителя

$$i'' = \frac{E_{2m}}{2Z_2} \cos(\omega t + \alpha - \varphi_2) - \frac{U_1}{r_2} + \left[i_0 + \frac{U_1}{r_2} - \frac{E_{2m}}{2Z_2} \cos(\alpha - \varphi_2) \right] e^{-\frac{\omega t}{Tg\varphi_2}}; \quad (II. 57)$$

в) при одновременной коммутации всех трех анодов выпрямителя

$$i''' = \left\{ \frac{E_{2m}}{2Z_2} \cos(\delta + \alpha - \varphi_2) - \frac{U_1}{r_2} + \left[i_0 + \frac{U_1}{r_2} - \frac{E_{2m}}{2Z_2} \cos(\alpha - \varphi_2) \right] e^{-\frac{\delta}{Tg\varphi_2}} + \frac{U_1}{r_3} \left(1 - e^{-\frac{\delta}{Tg\varphi_3}} \right) \right\} e^{-\frac{\delta - \omega t}{Tg\varphi_3}} - \frac{U_1}{r_3} \left(1 - e^{-\frac{\omega t}{Tg\varphi_3}} \right). \quad (II. 58)$$

В шахтных выпрямителях с трансформаторами типа ТМРШ-180/6 режим (в) наступает лишь при внешнем сопротивлении $R < 0,006 \text{ ом}$, т. е. практически при глухом коротком замыкании выпрямителя.

Для нахождения постоянной составляющей выпрямленного тока I_d получены зависимости: при $R > 0,006 \text{ ом}$:

$$I_d = \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{2\pi}{3} + \gamma}^0 i' d\omega t + \frac{3}{2\pi} \int_0^{\gamma} i'' d\omega t \quad (II. 78)$$

и при $R < 0,006 \text{ ом}$:

$$I_d = \frac{3}{2\pi} \int_0^{\delta} i''' d\omega t + \frac{3}{2\pi} \int_{\delta}^{\frac{2\pi}{3}} i'' d\omega t. \quad (II. 80)$$

Исследованием установлено, что угол зажигания анодов α рассматриваемого выпрямителя имеет только отрицательные значения. Следовательно, аноды вступают в работу раньше момента равенства э. д. с. коммутирующих фаз. При $R < 0,006$ ом угол α достигает величины (-57) эл. градусов, что указывает на включение анодов в работу даже при отрицательной э. д. с. соответствующей фазы вторичной обмотки трансформатора.

Угол коммутации двух анодов γ с увеличением тока возрастает, достигая 130 эл. градусов при $R < 0,006$ ом. Угол одновременной коммутации трех анодов δ при $R = 0$ равен 24 эл. градусам.

Внутреннее сопротивление выпрямителя r_b , определяемое как отношение падения напряжения в выпрямителе к току I_d , нелинейно зависит от тока. По мере увеличения I_d сопротивление r_b вначале увеличивается, при $I_d = 7000$ а достигает максимального значения, затем уменьшается.

По выражениям (II. 78) и (II. 80) построена внешняя вольтамперная характеристика выпрямителя (рис. 1, кривая 1). Она имеет нелинейный характер. Изгиб характеристики при токах 3000—4000 а обусловлен изменением падения напряжения в выпрямителе за счет возрастания угла α , а при токах 7000—8000 а — за счет увеличения угла δ . Экспериментальная внешняя характеристика — кривая 2, полученная осциллографированием, хорошо совпадает с расчетной — кривой 1. Различие величин I_d , полученных экспериментально и расчетом, не превышает $\pm 12\%$.

При обработке осциллограмм были выделены максимальные и минимальные значения пульсирующего тока и напряжения — кривые 3 и 4, определяющие амплитуды переменных составляющих тока I_m и напряжения U_m .

На рис. 1 приведены также внешние характеристики того же выпрямителя, вычисленные по общепринятой методике (линия 6) и по методике А. М. Утевского (линия 7). Ток глухого к. з. по этим характеристикам равен соответственно 4800 а и $28 \cdot 10^3$ а, т. е. он отличается от действительного [и вычисленного по выражению (II. 80)] более чем в два раза.

Предлагается графоаналитический метод определения токов к. з. в тяговых сетях, основанный на исполь-

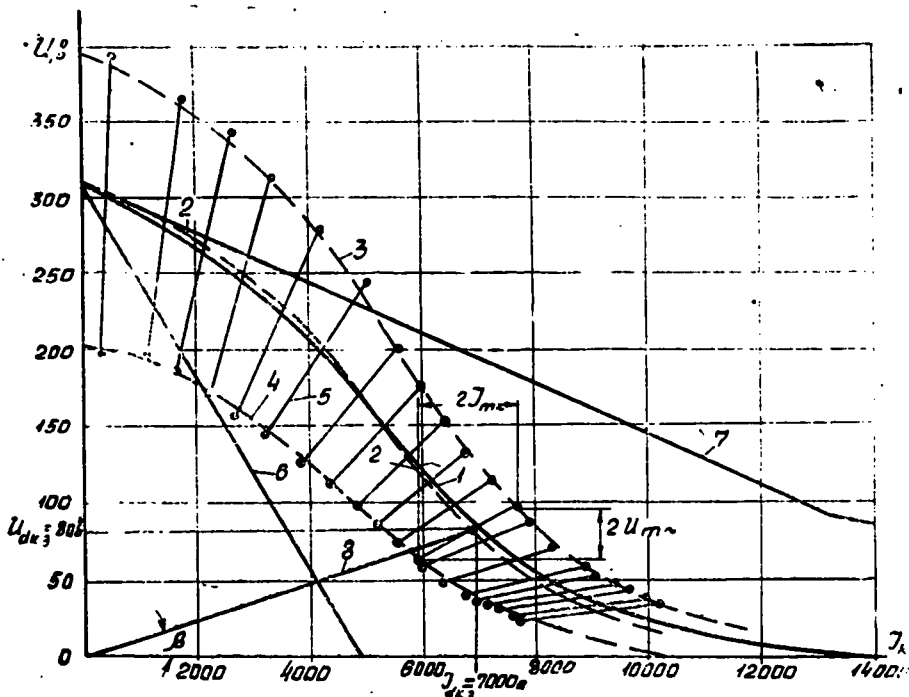


Рис. 1. Внешние вольтамперные характеристики тягового выпрямителя на номинальный ток 300 а.

звании заданного графика внешней вольтамперной характеристики выпрямителя, который предполагается указывать в каталогах. Внешнее сопротивление R вычисляется известным способом, а входящее в него сопротивление рельсового пути с учетом шунтирующего влияния земли — по приведенной в работе номограмме. Зная масштабы осей тока m_i и напряжения m_u графика внешней характеристики выпрямителя, определяется угол

β как $\beta = \arctg \frac{m_u}{m_i} R$. Под углом β к оси токов про-

водится прямая 8. Точка пересечения ее с графиком внешней характеристики дает искомый ток к. з. $I_{дкз}$, напряжение на шинах выпрямителя при этом токе $U_{дкз}$, и амплитуды переменных составляющих $I_{m~}$ и $U_{m~}$.

Теоретическое исследование переходных процессов при аномальных режимах в тяговом выпрямителе (ко-

роткие замыкания или пробой вентилей) выполнено путем разделения всего периода переходного процесса на несколько интервалов с одинаковым количеством открытых прямым током вентилей, составления и графического решения для каждого интервала дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в выпрямителе в рассматриваемый момент времени. Были учтены активные и индуктивные сопротивления трансформатора и прямое падение напряжения на вентилях.

Установлено, что скорость нарастания тока в момент возникновения к. з. определяется из выражения (для первого интервала)

$$\left(\frac{di_{кз}}{dt}\right)_1 = E_{2m} \left[\frac{\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6} + \beta - \varphi_1\right)}{\sqrt{L^2_1 + \left(\frac{r_1}{\omega}\right)^2}} + \frac{1}{L_1} \cos\varphi_1 \sin\left(\frac{\pi}{6} + \beta - \varphi_1\right) e^{-\frac{\omega t}{T_{г\varphi_1}}} \right] - \frac{U_d}{L_1} e^{-\frac{\omega t}{T_{г\varphi_1}}}, \quad (II. 96)$$

а в момент пробоя вентиля

$$\left(\frac{di_{от}}{dt}\right)_1 = \frac{\sqrt{3} E_{2m}}{2Z_s} \left[\cos(\omega t - \varphi_s) - \cos\varphi_s e^{-\frac{\omega t}{T_{г\varphi_s}}} \right]. \quad (II. 109)$$

В момент возникновения к. з. величина $\left(\frac{di_{кз}}{dt}\right)_1$ достигает 1200—2600 *а/мсек* (в зависимости от угла возникновения к. з. β), а затем уменьшается. Ток глухого к. з. выпрямителя достигает установившегося значения за 5,5÷11 *мсек* (100—200 эл. градусов). С увеличением R это время уменьшается.

В момент пробоя (обратного зажигания) вентилей величина $\left(\frac{di_{от}}{dt}\right)_1$ равна нулю, затем она растет, достигая максимального значения 2700 *а/мсек* через 3,3 *мсек* (60 эл. градусов), после чего уменьшается. Ток в пробитом вентиле в каждом периоде питающего напряжения изменяется от нуля до максимального значения (8800 *а*). Этот ток создает нескомпенсированный магнитный поток в сердечнике питающего трансформатора, вызывая большое динамическое усилие в проводах его обмоток.

Глава III. РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К АППАРАТУРЕ ЗАЩИТЫ РУДНИЧНЫХ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ И ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Короткие замыкания в тяговой сети, питающих кабелях и тяговых подстанциях сопровождаются, как правило, электрической дугой, способной воспламенить дерево, угольную пыль, пласт угля, кабельную изоляцию, вызвать пережог контактного провода, кабеля или же повреждение выпрямителей.

За последние 10 лет количество крупных пожаров, вызванных замыканиями в рудничных тяговых сетях, составило 10—15% от всех пожаров в электросетях и электрооборудования шахт. Почти половина всех пожаров (более 42%) была вызвана повреждениями в питающих кабелях (обрушение кровли выработок и т. д.), около 35% пожаров вызвано замыканиями контактного провода на металлическую крепь из-за деформации крепи, пробоя изоляторов подвесок и т. д.

Для предотвращения пожаров от замыкания в тяговой сети защитные аппараты должны отключать сеть раньше, чем расположенные по близости от места замыкания горючие материалы нагреются до температуры воспламенения. Достичь этого можно только при правильном выборе токовых характеристик защитных устройств.

В работе приведены результаты экспериментального исследования токовых характеристик воспламеняемости различных материалов. Показано, что от электрической дуги материалы воспламеняются раньше, чем от такого же по величине бездугового сосредоточенного тока утечки.

Для определения токовых характеристик воспламеняемости материалов был изготовлен специальный стенд, содержащий дугообразователь, автоматические выключатели, специальное тириatronное реле времени, выпрямитель и т. д. Токовые характеристики получены при условиях наименьшего времени воспламенения материалов.

Испытываемые образцы (дерево—щепки и бруски различной влажности, изоляционная промасленная бумага бронированных кабелей, уголь, куски бронированных и гибких кабелей) располагались на расстоянии

2—3 мм выше контактов дугообразователя. Контакты дугообразователя замыкались и размыкались, возникала электрическая дуга, которая через определенное время отключалась. Опытным путем было установлено такое соотношение между током и временем горения дуги, при котором образец обугливался (но не воспламенялся) при воздействии на него электрической дуги с током до 300 а не менее 180—200 раз, а при токе более 300 а—30—40 раз.

Требуемая токовременная характеристика защитных аппаратов тяговой сети была получена в соответствии с рекомендациями МакНИИ путем уменьшения в 1,5—2 раза времени воспламенения промасленной изоляционной бумаги бронированных кабелей как наиболее легко воспламеняющегося материала. В соответствии с полученной требуемой характеристикой защиты время отключения сети должно уменьшаться с увеличением тока к. з. При величине тока дуги 7 а время отключения защиты должно быть не менее 100 мсек, а при токе дуги 1000 а— всего 30 мсек, т. е. коммутационный аппарат защиты должен быть быстродействующим.

Требуемые токовременные характеристики защиты тяговых подстанций определяются только перегрузочной способностью вентилях тяговых выпрямителей.

Так как выпрямители и тяговые сети имеют различные перегрузочные характеристики, к защите сетей и выпрямителей следует предъявлять различные требования в отношении уставок срабатывания и быстродействия. Выпрямители следует защищать от прямых и обратных токов перегруза, а сеть — только от прямых токов перегруза и утечки. В связи с этим, а также учитывая необходимость обеспечения селективности защиты, необходимо сети и выпрямители защищать различными аппаратами: сети — участковыми фидерными выключателями, осуществляющими защитные и коммутационные отключения отдельных участков тяговой сети; выпрямители — главными отключающими устройствами, обеспечивающими защиту выпрямительных агрегатов от аварийных прямых и обратных токов.

В участковых выключателях требуется предусматривать максимальную защиту, реле утечки или устройство, реагирующее на ток замыкания на землю более 5 а, спо-

способный поддерживать электрическую дугу, а также блокировочные устройства, исключающие подачу рабочего напряжения на поврежденную сеть.

Главные отключающие устройства необходимо снабжать быстродействующими датчиками перегруза вентилями прямыми и обратными токами, быстродействующими коммутационными аппаратами и элементами температурной защиты.

Глава IV. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УЧАСТКОВЫХ ФИДЕРНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РУДНИЧНЫХ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ОТ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Ни один из известных способов защиты тяговых сетей железнодорожного, городского и рудничного электро-транспорта не удовлетворяет обоснованным требованиям к защите подземных сетей по установкам срабатывания, быстродействию, исполнению и т. д.

Особенно трудно создать защиту, реагирующую на малые токи замыкания в тяговой сети (около 5 а), способные поддерживать электрическую дугу и вызывать пожар в шахте. Так как цепь замыкания тока на землю включена параллельно нагрузке сети (электровозам), обычные измерители тока или напряжения не могут обнаружить столь малый ток замыкания на землю, не реагируя на ток электровозов. Известные устройства частотной защиты (РУКС, РКС) сравнительно сложны, громоздки и имеют пока ограниченную область применения (только контактные сети ограниченной длины с ограниченным количеством электровозов).

В работе доказана возможность осуществления защиты контактных сетей и питающих кабелей от токов замыкания на землю (5 а и более) с использованием переменной составляющей выпрямленного напряжения в качестве оперативного напряжения защиты.

Прежде чем исследовать специальные защитные устройства, были рассмотрены электрические параметры цепи электровоза как пассивного двухполюсника и тяговой сети — как пассивного четырехполюсника на частоте пульсации выпрямленного напряжения.

Исследованием установлено, что взаимная магнитная связь переменных составляющих потоков главных полюсов, добавочных полюсов и якоря тягового двигателя слабая. На этом основании сложная магнитная цепь двигателя с некоторым допущением была разделена на три магнитно не связанных контура: цепь переменного потока главных полюсов $\dot{\Phi}_g$, цепь потока якоря $\dot{\Phi}_a$ и цепь потока добавочных полюсов $\dot{\Phi}_d$.

Величины комплексных магнитных сопротивлений отдельных участков магнитной цепи двигателя найдены по методике Л. Р. Неймана с учетом рекомендаций В. Б. Скобелева. Комплексы электрических сопротивлений обмоток выражены через комплексы магнитных сопротивлений сердечников:

$$Z_{\sigma g} = \frac{j\omega w_g^2 n_g}{Z_{\text{пр } m \text{ г}}} = \frac{\omega w_g^2 n_g}{Z_{\text{мг}}} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_g\right)}, \quad (\text{IV. 9})$$

где

$Z_{\text{мг}}$ и α_g — модуль и аргумент комплекса магнитного сопротивления цепи потока главных полюсов.

Введено условное сопротивление, учитывающее переменную составляющую противо-э. д. с. вращения якоря \dot{E}_a :

$$Z_{\sigma a} = \frac{\dot{E}_a}{i} = \frac{pn w_a w_r n_a n_r}{\sqrt{2} 60a Z_{\text{мг}}} e^{-j\alpha_r}, \quad (\text{IV. 22})$$

где p — число оборотов якоря в минуту.

Теоретически и экспериментально установлено, что угловой аргумент комплекса общего электрического сопротивления тягового двигателя электровоза $\varphi_{\text{пр}}$ почти не зависит от мощности двигателя и размеров магнитопроводов. Он незначительно уменьшается при увеличении числа оборотов якоря p и количества витков обмоток w_a, w_r и незначительно возрастает при увеличении постоянного тока двигателя (из-за увеличения магнитных сопротивлений насыщающихся магнитопроводов). Экспериментально и теоретически полученные значения общего электрического сопротивления $Z_{\text{пр}}$ и угла $\varphi_{\text{пр}}$ тягового двигателя при трехпульсовом напряжении сети равны:

$Z_{\text{пр}} = 24 \pm 12 \text{ ом}$, $\varphi_{\text{пр}} = 57 \pm 62$ эл. градусов, а при шести-пульсовом — $Z_{\text{пр}} = 36 \pm 23 \text{ ом}$, $\varphi_{\text{пр}} = 55 \pm 58$ эл. градусов.

Исследованием найдено, что фазовый угол сопротивления контактной сети гораздо меньше фазового угла сопротивления электровоза, а питающих кабелей — почти равен $\varphi_{\text{эл}}$. Сопротивление выпрямительных установок на частоте пульсации в сотни раз меньше сопротивления цепи электровозов. Оно не влияет на величину сдвига фаз между переменными составляющими тока и напряжения тяговой сети, а вызывает лишь изменение переменной составляющей напряжения на зажимах сети при изменении тока.

На ток электровозов почти не реагируют фазочувствительные устройства в виде реле мощности или фазочувствительного транзисторного ключа. Защитное действие этих устройств основано на различии угла сдвига фаз между переменными составляющими напряжения и тока сети при электровозной (активно индуктивной) нагрузке и чисто активном токе замыкания на землю. Фазочувствительный измеритель настраивается фазопоротной схемой таким образом, чтобы при работе электровозов и отсутствии тока замыкания на землю его выходной сигнал равнялся нулю. При появлении тока замыкания угол сдвига фаз между переменными составляющими напряжения и общего тока сети уменьшается, в результате чего на выходе измерителя появляется сигнал, вызывающий срабатывание отключающего устройства. Величина угла α , на которую уменьшается угол сдвига фаз, зависит от переменных составляющих токов электровозов $I_{\text{эл}}$ и цепи замыкания $I_{\text{з}}$, а также фазового угла цепи электровозов $\varphi_{\text{эл}}$. При неизменном токе $I_{\text{з}}$ с увеличением тока электровозов $I_{\text{эл}}$ угол α уменьшается. Для поддержания постоянной уставки тока срабатывания защиты измеритель тока $I_{\text{з}}$ выполняется таким образом, чтобы его выходной сигнал определялся произведением:

$$A = kU_{\sim}I_{\sim}\sin\alpha = kU_{\sim}\sin\varphi_{\text{эл}}q_{\text{з}}I_{\text{з0}}, \quad (\text{IV. 43})$$

где k — постоянный коэффициент, определяемый конструкцией измерителя;

$I_{\text{з0}}$ — постоянная составляющая тока замыкания на землю.

Выражение (IV.43) наиболее полно удовлетворяется при использовании чувствительного к току I_{30} элемента в виде измерителя мощности.

В соответствии с этим в Донецком политехническом институте доц. к. т. н. Н. И. Колосков, доц. к. т. н. Д. П. Пампура и автор данного исследования разработали выключатель для рудничных тяговых сетей типа АВК, в котором в качестве чувствительного к токам замыкания на землю органа применено специальное индукционное дисковое реле мощности. Реле не реагирует на любой ток электровозов, но четко срабатывает и подает сигнал на отключение сети при токе замыкания более 5—7а. Выключатель снабжен элементами трехкратного автоматического повторного включения (АПВ) напряжения в сеть, устройствами блокировки схемы и сигнализации.

С 1965 г. выключатели АВК серийно изготавливаются Макеевским экспериментальным заводом. Длительный опыт эксплуатации выключателей показал достаточно хорошую их работоспособность. Было отмечено много случаев отключения сети при замыканиях контактного провода на металлическую крепь, вагонетку, раму электровозов и т. д., а также при возникновении утечек тока (более 5а) на самих электровозах и в питающих бронированных и гибких кабелях. Однако выявлены и некоторые недостатки выключателей, связанные в основном с большой инерционностью дискового индукционного реле, которое не обеспечивало необходимого быстрого действия защиты с точки зрения пожаробезопасности. Выявлена также необходимость перед каждым включением опробовать состояние изоляции сети для предотвращения подачи рабочего напряжения на короткозамкнутую сеть.

В связи с изложенным, автором разработан выключатель типа АВТС, в котором устранены отмеченные недостатки. В качестве чувствительного к токам замыкания органа применен однополупериодный фазочувствительный ключ на двух транзисторах (рис. 2, а), более быстродействующий и надежный в работе, чем реле мощности.

Напряжение $u_{2н}$ питания ключа подается от вторичной обмотки трансформатора напряжения, включенного

на зажимы тяговой сети через разделительный конденсатор и фазоповоротный орган (переменный резистор). Ток i_y управления ключом поступает от вторичной обмотки трансформатора тока с ненасыщающимся сердечником, первичная обмотка которого включена в сеть последовательно.

Для определения условий нечувствительности схемы рис. 2, а к токам электровозов рассмотрены два режима работы ключа: а) режим усиления (участки ab и de или fe — рис. 2, в), когда соблюдается неравенство $\beta i_y > I_r + i_c$ (i_r и i_c — токи в резисторе r_{np} и емкости C_{np} цепи замещения нагрузки ключа — рис. 2, б при полностью открытом ключе) и б) режим насыщения (участок bcd — рис. 2, в), когда ключ полностью открыт и соблюдается неравенство $\beta i_y > I_k = I_r + i_c$.

Постоянная составляющая тока I_{cp} определяется из рис. 2, в:

$$I_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi_2}^{\varphi_2 + \delta_1} \beta I_{ym} \sin(\omega t - \varphi_2) d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi_2 + \delta_1}^{\pi + \varphi_2 - \delta_2} U_{km} \times$$

$$\times \left(\frac{1}{r_{np}} \sin \omega t + \omega C_{np} \cos \omega t \right) d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi + \varphi_2 - \delta_2}^{\pi + \varphi_2} \beta I_{ym} \sin(\omega t - \varphi_2) d\omega t$$
(IV. 68)

Углы δ_1 и δ_2 находятся из соотношений:

$$\delta_1 = \arccos \frac{m + n \sin \varphi_2 - \cos \varphi_2}{\sqrt{m^2 + n^2 + 1 + 2m(n \sin \varphi_2 - \cos \varphi_2)}}, \quad (IV. 70)$$

$$\delta_2 = \arccos \frac{m - n \sin \varphi_2 + \cos \varphi_2}{\sqrt{m^2 + n^2 + 1 + 2m(\cos \varphi_2 - n \sin \varphi_2)}}, \quad (IV. 71)$$

где
$$m = \frac{\beta I_{ym} r_{np}}{U_{km}}, \quad (IV. 72)$$

$$n = \omega r_{np} C_{np}. \quad (IV. 73)$$

Чтобы защита не реагировала на ток электровозов, должно соблюдаться условие: $I_{cp} = 0$. Приравняв пра-

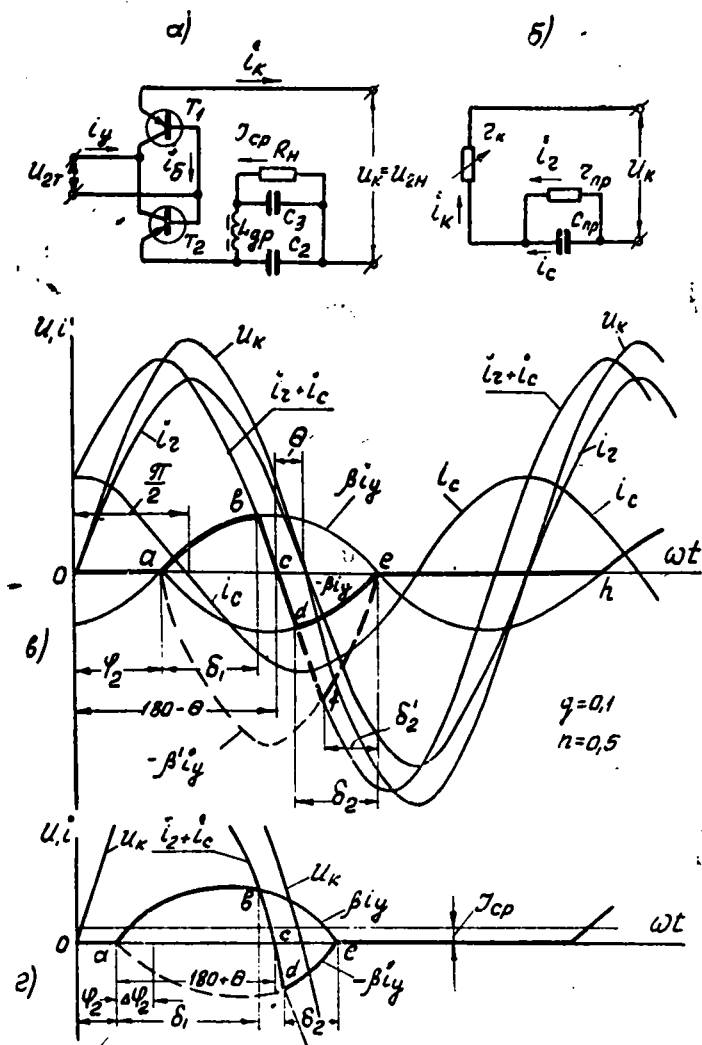


Рис. 2. Действительная (а) и приведенная (б) схемы чувствительного к токам замыкания на землю элемента защиты (фазочувствительного ключа) и временные диаграммы напряжений и токов в нем: θ — при $\varphi_2 = \varphi_{2n}$; z — при $\varphi_2 < \varphi_{2n}$.

ную часть выражения (IV. 68) нулю и решив его относительно φ_2 , получим уравнение зависимости угла нечувствительности схемы к токам электровозов φ_{20} от параметров фильтра:

$$\varphi_{20} = \arctg \omega R_{II} \left[(C_2 + C_3 - \omega^2 C_2 C_3 L_{дп}) (1 - \omega^2 C_2 L_{дп}) - \frac{L_{дп}}{R_{II}^2} (1 - \omega^2 C_2 L_{дп}) \right]. \quad (IV. 76)$$

Получение угла $\varphi_2 = \varphi_{20}$ достигается подбором параметров элементов электрических цепей, которыми фазочувствительный ключ включается в тяговую сеть в соответствии с выражением

$$\varphi_{20} = \varphi_{эл} + \gamma_{1II} + \beta_{1II} + \delta_T + \psi_{2T} - \psi_{1II} - \psi_{2II} - \frac{\pi}{2}, \quad (IV. 80)$$

где γ_{1II} — угол сдвига фаз между первичным током и напряжением трансформатора напряжения (ТН);

β_{1II} — угол сдвига фаз между первичным током ТН и общим переменным напряжением сети;

δ_T — угол отставания потока от первичного тока трансформатора тока (ТТ);

ψ_{2T} — угол сдвига фаз между вторичными э. д. с. и напряжением ТТ;

ψ_{1II}, ψ_{2II} — углы сдвига фаз между э. д. с. и напряжением соответственно первичных и вторичных цепей ТН.

Отстройка фазочувствительного органа от токов электровозов осуществляется изменением величины угла β_{1II} :

$$\beta_{1II} = \arctg \frac{x'_{э1II} + \omega L_{1дп} - \frac{1}{\omega C_{1II}}}{r'_{э1II} + R_{1II}}, \quad (IV. 82)$$

где

$x'_{э1II}, r'_{э1II}$ — приведенные к первичной цепи эквивалентные реактивное и активное сопротивления обмоток ТН и его нагрузки;

C_{1II} — емкость, отделяющая переменное напряжение сети от постоянного;

$L_{1н}, R_{1н}$ — индуктивность дросселя с отводами и сопротивление переменного резистора в первичной цепи ТТ.

Решая совместно выражения (IV.80) и (IV.82), найдем величины $L_{1др}$ и $R_{1н}$, обеспечивающие условие нечувствительности схемы к токам электровозов: $\varphi_2 = \varphi_{20}$.

Постоянное напряжение U_n на резисторе R_n нагрузки ключа зависит от тока замыкания на землю в тяговой сети I_{30} в соответствии с выражением

$$U_n = \frac{U_{км} R_n}{2\pi r_{пр}} \times \\ \times \left\{ \sqrt{m_3^2 + n^2 + 1 + 2m_3[\cos(\varphi_{20} - \alpha) - n \sin(\varphi_{20} - \alpha)]} - \right. \\ \left. - \sqrt{m_3^2 + n^2 + 1 + 2m_3[n \sin(\varphi_{20} - \alpha) - \cos(\varphi_{20} - \alpha)]} \right\}, \quad (IV.94),$$

где $m_3 = \frac{\sqrt{2} \beta r_{пр} k_T (\dot{q}_{эл} I_{30} + \dot{q}_3 I_{30})}{\dot{U}_{км} \left(1 + \frac{r_{ук}}{R_{2т}}\right)}, \quad (IV.95)$

k_T — коэффициент пропорциональности между первичным и вторичным токами ТТ;

$r_{ук}$ — сопротивление цепи управления ключом;

$R_{2т}$ — сопротивление резистора, шунтирующего вторичную обмотку ТТ;

Вычисленное из уравнения (IV.94) напряжение U_n хорошо совпадает с полученным экспериментально, расхождения не превышают 7%.

При увеличении электровозного тока I_{30} напряжение U_n незначительно уменьшается. Это вызывает некоторое «заглубление» защиты, т. е. повышение уставки срабатывания. Так, изменение I_{30} от 0 до 200 а повышает уставку срабатывания защиты с 3,0 до 3,6 а, или с 7,0 до 7,8 а.

Опытно-промышленная партия выключателей АВТС с рассмотренным измерителем тока замыкания на землю изготовлена Макеевским экспериментальным заводом и прошла промышленные испытания на шахтах комбината «Донецкуголь». Выключатель контролирует состояние изоляции сети перед каждым включением и при $R_{из} < R_{уст} = 10 + 60 \text{ ом}$ не допускает подачу рабочего напряжения в поврежденную сеть. АВТС отключает сеть при токе электровозов $I_{30} > I_{уст \text{ сраб } \text{эл}} = 600 - 1200 \text{ а}$ или

при токе замыкания на землю $I_{30} > I_{уст\ сраб.з} = 3 \div 40 a$. Уставка тока срабатывания максимальной защиты принимается в соответствии с количеством работающих электровозов на защищаемом участке сети. Уставку тока срабатывания фазочувствительного ключа приходится увеличивать более 3—5 a при питании от тяговой сети активной нагрузки (например, осветительных ламп и т. д.). Схема выключателя почти полностью бесконтактная (содержит только один контактный элемент — силовой контактор) выполнена на тиристорах, транзисторах и полупроводниковых диодах.

Выключатели АВТС более полно, чем АВК, удовлетворяют требованиям к защите рудничных тяговых сетей.

Глава V. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛАВНЫХ ВЫКЛЮЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ТЯГОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ОТ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ

В работе показано, что контактные защитные аппараты (быстродействующие выключатели и короткозамыкатели) довольно сложны, громоздки и не обеспечивают достаточно надежной защиты тяговых выпрямителей.

В данном исследовании основное внимание уделено разработке бесконтактного защитного устройства, отключающего аварийные токи путем «запирания» управляемых вентилях тяговых выпрямителей. Разработка защитного устройства велась применительно к выпрямителям с общим катодом вентилях и выведенной нулевой точкой силовых трансформаторов.

Экспериментально установлено, что тяговые выпрямители «запираются» электродами управления тем надежней, чем меньше промежуток времени от начала аномального режима до подачи на эти электроды «запирающего» потенциала. Продолжительность этого промежутка определяется, в основном, временем срабатывания чувствительного к токам перегруза или к. з. органа датчика перегруза. Поэтому к датчикам перегруза вентилях предъявлено требование повышенного быстродействия: они должны подавать сигнал о перегрузе не позже, чем через 1,0 $msec$ после момента превышения током защищаемой цепи уставки срабатывания защиты.

В известных отечественных и зарубежных схемах секторной защиты тяговых выпрямителей наиболее распространены датчики перегруза в виде трансформаторов тока в первичной или вторичной цепях силовых трансформаторов. Однако вторичный ток трансформатора тока в переходном режиме значительно отличается от первичного и отстает во времени от нарастающего тока к. з. в силовой цепи постоянного тока защищаемого выпрямителя. Это вызывает нестабильность уставки тока срабатывания и увеличивает время срабатывания защиты.

В связи с изложенным разработан быстродействующий бесконтактный датчик перегруза выпрямителей, основанный на использовании для целей защиты элемента Холла. Датчик Холла практически безынерционный, величина его выходного сигнала прямо пропорциональна току защищаемой цепи. Применение элемента Холла позволило разделить электрические цепи силовую и защиты, благодаря чему четкость действия и надежность защиты намного возросли.

Элемент Холла помещен в зазоре среднего стержня Ш-образного магнитопровода, охваченного одним витком шины, включенной в защищаемую цепь. Выходной сигнал элемента Холла поступает на вход полупроводникового переключающегося реле (ППР), выполненного на трех транзисторах. На выходе ППР включена управляющая цепь тиристора, осуществляющего запирающее действие на тяговый выпрямитель. Уставка срабатывания защиты регулируется с помощью переменного резистора в цепи питания элемента Холла.

Нагревание описанного датчика перегруза (ДП) вызывает незначительное снижение уставки тока срабатывания (при увеличении температуры датчика от 20 до 60°C уставка снижается на 2—7%), а повышение напряжения питания схемы ППР на 20%, наоборот, повышает уставку тока срабатывания на 2—5%. Длительные испытания показали, что уставка тока срабатывания остается во времени практически неизменной. Осциллографированием токов установлено, что уставка тока срабатывания защиты совершенно не зависит от скорости нарастания тока к. з. Датчик четко срабатывал в момент превышения током защищаемой цепи уставки срабатывания при сколь угодно малой скорости нарастания тока.

Лабораторные и шахтные испытания датчика пере-

груза на элементе Холла показали высокую надежность его действия. На более чем 20000 срабатываний было всего два отказа из-за обрывов цепи в ППР.

Для защиты силовых вентилях от перегруза при обратном зажигании или пробое одного из них разработан датчик пробоя вентилях (ДПВ). При пробое вентилях датчик ДПВ «запирает» «здоровые» вентилях и отключает масляный выключатель в цепи выпрямителя.

Для защиты тяговой сети между выпрямителем и участковыми выключателями (с реле утечки БРУ) от опасных в пожарном отношении токов замыкания на землю, в схеме выпрямителя предусмотрено фазочувствительное устройство ФЧУ, подобное примененному в выключателях АВТС. Уставка тока срабатывания этого устройства принята на 20—30% выше суммы уставок срабатывания подключенных к выпрямителю участковых выключателей.

Разработанные датчики перегруза исследовались при защите тяговых выпрямителей на ртутных вентилях и тиристорах. В рабочем режиме силовые тиристоры открывались однополупериодными импульсами тока от специального трехфазного трансформатора, вторичные э. д. с. которого опережали фазные э. д. с. силового трансформатора на 60 эл. градусов. Выходные импульсы от датчиков ДП, ДПВ и ФЧУ поступали на управляющий электрод нормально закрытого тиристора (ключевого элемента схемы) в цепи источника запирающего напряжения. Открывание этого тиристора приводило к одновременному «запиранию» всех силовых тиристоров. Ток перегруза или к. з. в открытом к моменту запирания вентилях постепенно снижался до нуля, после чего выпрямитель оказывался закрытым. При таком способе отключения рабочих и аномальных токов исключаются перенапряжения в силовых цепях выпрямителей.

После запирания тиристоров включалась цепь опробования сети и, если замыкание в течение 10 сек ликвидировалось, происходило автоматическое повторное включение выпрямителя. Участок, на котором возникло замыкание в сети, оставался выключенным (реле БРУ не позволяло включаться выключателю), остальные участки включались в работу. При коротком замыкании между выпрямителем и распредпунктом через 10 сек после начала контроля изоляции сети отключался мас-

ляный выключатель, цепь собственных нужд и подавался аварийный сигнал диспетчеру.

При отключении токов глухого к. з. на шинах трехпульсового выпрямителя бесконтактной защитой (рис. 3, а) максимальное значение тока к. з. i_k зависит от угла возникновения к. з. β . Ток I_{mk} достигает наибольшего значения при $\beta = (-30) \div 0$ эл. градусов. В шестипульсовом выпрямителе (рис. 3, б) угол β почти не влияет на I_{mk} . При отсутствии токоограничивающего дросселя значение тока I_{mk} не достигает предельного значения на перегрузочной характеристике ртутных вентилях, но значительно превышает предельно допустимый ток для тиристорov. Поэтому для тиристорного тягового выпрямителя с бесконтактной защитой требуется токоограничивающий дроссель.

Необходимая индуктивность дросселя была найдена в результате совместного графического решения двух равенств:

$$\begin{aligned} \frac{Z_1}{E_{2m}} \left(k_n I_n + \frac{U_a}{r_1} \right) - \sin(\omega t_m - \varphi_1) &= \operatorname{tg} \varphi_1 \cos(\omega t_m - \varphi_1) = \\ &= \left[\frac{Z_1}{E_{2m}} \left(I_n + \frac{U_a}{r_1} \right) + \sin \varphi_1 \right] e^{-\frac{\omega t_m}{\operatorname{tg} \varphi_1}}, \quad (V. 12) \end{aligned}$$

где k_n — коэффициент допустимой перегрузки тиристорov: $k_n = 5-8$;

I_n — номинальный ток тиристорov;

U_a — начальное прямое падение напряжения на вентилях;

Z_1, r_1 — общее и активное сопротивления цепи к. з. выпрямителя (включая искомое сопротивление дросселя);

ωt_m — значение текущего времени (фазового угла) в эл. градусах, при котором всплеск отключаемого тока к. з. i_k достигает максимума (I_{mk}).

При номинальном токе тиристорov $I_n = 300$ а и $k_n = 7$ для обеспечения нормального срока службы тиристорov требуется дроссель индуктивностью $L_{др} = 0,8$ мГн. Осциллограмма бесконтактного отключения тока к. з. при этой индуктивности приведена на рис. 3, з.

Описанная аппаратура бесконтактной защиты тяговых выпрямителей прошла длительные лабораторные и

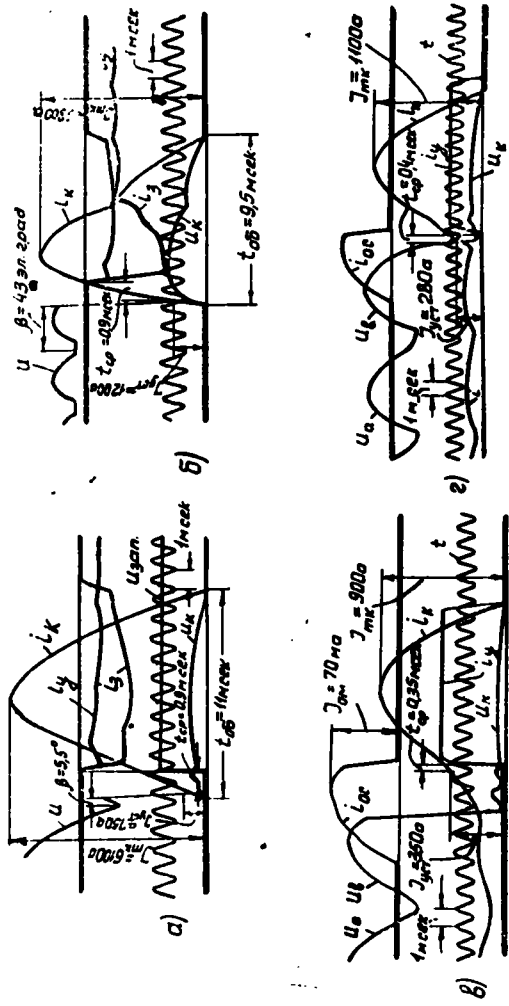


Рис. 3. Осциллограммы бездугового отключения токов глухого к. з. на шинах тяговых выпрямителей с разработанной аппаратурой защиты: а — трехпульсовый выпрямитель, $L_{др} = 0$; б — шестипульсовый выпрямитель, $L_{др} = 0$; в — тиристорный трехпульсовый выпрямитель, $L_{др} = 1,6 \text{ мГн}$; г — то же, $L_{др} = 0,8 \text{ мГн}$.

шахтные (с ртутным вентилем) испытания. Произведено свыше 12000 отключений токов перегруза и глухого к. з. тягового выпрямителя с ртутным вентилем и свыше 12500 отключений тягового выпрямителя на силовых тиристорах. Схемы четко отключали (без электрической дуги) практически любые токи перегруза, включая токи глухого к. з. на шинах выпрямителя. За 11 месяцев шахтных испытаний схема сработала 523 раза, отключая токи перегруза и к. з. Ни одного отказа в бесконтактном отключении аномальных токов выпрямителя не было.

На основании результатов промышленных испытаний МУП УССР рекомендовало Запорожскому электроаппаратному заводу изготовить опытную партию тяговых выпрямителей с разработанной защитой в количестве 10 штук.

КРАТКАЯ СВОДКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Наличие в рудничной тяговой сети неизолированных проводников (контактного провода и соединенного с землей рельсового пути) повышает вероятность возникновения коротких замыканий или утечек тока, способных вызвать пожар в шахте, вывести из строя контактный провод, питающие кабели или тяговые выпрямители. Величина токов замыкания на землю при касании контактного провода металлической крепи составляет 45—700 *a*, пласта угля — 0,25—0,6 *a*, стенок выработки — 0,07—0,3 *a*.

2. На величину сопротивления рельсового пути как обратного провода тяговой сети большое влияние оказывает «земля». При влажной почве «земля» уменьшает сопротивление рельсов в 10 раз и больше. Предложенная методика расчета сопротивления рельсового пути более правильно, чем известные методы, учитывает шунтирующее влияние «земли» применительно к подземным тяговым сетям.

3. Исследованием установлено, что при чисто активной нагрузке внешняя вольтамперная характеристика тягового выпрямителя нелинейна, а внутреннее сопротивление выпрямительного агрегата — непостоянно:

при увеличении выпрямленного тока оно растет, достигает максимума, затем снижается.

4. Предложенный метод расчета установившихся токов перегруза и к. з. тяговых выпрямителей более полно, чем известные методы, учитывает особенности параметров цепи к. з. подземных тяговых установок. Вычисленный по методике В. Н. Стасюка ток к. з. меньше действительного в 1,5—2,5 раза, по методике А. М. Утевского больше действительного в 1,4—2 раза, по предложенной методике — отличается от действительного на ± 10 —12%.

5. Исследование переходных процессов при аномальных режимах выпрямителей показало, что в момент возникновения короткого замыкания скорость нарастания тока наибольшая, достигает (при глухом к. з. выпрямителя) 2600 *а/мсек*, а затем уменьшается. В момент возникновения обратного зажигания (или пробоя вентилей) скорость нарастания тока близка к нулю, затем увеличивается, достигая максимального значения (2700 *а/мсек*) через 3,3 *мсек*. Ток глухого к. з. на шинах выпрямителя достигает установившегося значения через 5,5—11 *мсек* после момента возникновения к. з. На основании этих исследований обоснованы требования к токовременным характеристикам защиты выпрямителей.

6. В работе показано, что в выпрямительных агрегатах наименьшую перегрузочную способность имеют вентили (ртутные или полупроводниковые). Поэтому требуемая токовременная характеристика защиты тяговых выпрямителей в целом определяется только перегрузочной способностью принятых вентилей.

7. Экспериментально установлено, что сосредоточенный ток утечки более 40 *ма*, замыкающийся через «мостик» из угольной пыли, способен обуглить дерево. Особую опасность представляет ток замыкания в тяговой сети свыше 5—6 *а*, способный поддерживать устойчивую электрическую дугу и вызывать пожар или пережог провода, кабеля и т. д.

На основании экспериментальных исследований характеристик воспламеняемости дерева, угля, бронированных и гибких кабелей от электрической дуги получена требуемая токовременная характеристика защиты рудничных тяговых сетей. В соответствии с этой характеристикой время отключения сети защитой должно сни-

жаться при увеличении тока замыкания: при токе 5—7 а защита должна отключить сеть за 100 мсек, а при токе к. з. 1000 а — за 30 мсек.

8. Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказана возможность использования пульсации выпрямленного напряжения для целей защиты тяговой сети от токов замыкания более 3—5 а. Наиболее приемлем чувствительный к токам замыкания орган в виде измерителя мощности или фазочувствительного однополупериодного ключа на транзисторах.

9. Разработанные и серийно изготавливаемые выключатели типа АВК с чувствительным к токам замыкания органом в виде индукционного дискового реле мощности, средствами АПВ, блокировки и сигнализации повышают пожаробезопасность и бесперебойность эксплуатации рудничных тяговых сетей, однако имеют большое время отключения.

Разработанные и испытанные на шахтах выключатели типа АВТС с чувствительным к токам замыкания органом в виде фазочувствительного однополупериодного ключа на транзисторах, бесконтактной схемой АПВ, опробованием состояния изоляции сети, перед каждым включением, сигнализацией и блокировкой, более полностью удовлетворяют основным требованиям к участковым выключателям тяговых сетей.

10. Данным исследованием доказана возможность бесконтактного отключения практически любых аномальных токов тяговых выпрямителей (включая токи глухого к. з. на шинах постоянного напряжения) «запираемым» управляемым вентилем (ртутных или полупроводниковых) выпрямителей. Для предотвращения термического перегруза силовых вентилях при бесконтактном отключении токов к. з., в цепи постоянного тока выпрямителей на ртутных вентилях не требуется токоограничивающий дроссель, а на тиристорах — необходим дроссель небольшой индуктивности.

11. Разработанная и испытанная на шахтах аппаратура бесконтактного запираения вентилях с быстродействующим датчиком перегруза на элементе Холла надежно отключает любые токи перегруза или к. з., предотвращая термическое или электродинамическое повреждение выпрямителей.

12. Результаты проведенных исследований использовали:

а) Макеевский экспериментальный завод — наладил серийный выпуск выключателей типа АВК и изготовил опытно-промышленные образцы выключателей АВТС. На второй квартал 1969 г. завод наметил выпуск промышленной партии выключателей АВТС;

б) институт Гипронисэлектрошахт — при разработке передвижных источников постоянного тока;

в) комиссия МУП УССР — рекомендовала Запорожскому электроаппаратному заводу изготовить опытную партию выпрямителей с разработанной аппаратурой бесконтактной защиты.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ БЫЛИ ДОЛОЖЕНЫ:

1) на Всесоюзной научно-технической конференции по электрификации и автоматизации горной промышленности, г. Днепропетровск, ДГИ, 1965 г.;

2) на Всеукраинской юбилейной конференции по вопросам обобщения результатов научных достижений вузов в области горного дела, г. Донецк, ДПИ, 1967 г.;

3) на научно-технических конференциях ДПИ, г. Донецк, 1965—1966 гг.;

4) на Межведомственном совещании по вопросам рудничного локомотивостроения, г. Донецк, Донгипроуглемаш, 1966 г.

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ
ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ АВТОРА:**

1. Электрическое сопротивление рудничных рельсовых путей с учетом шунтирующего влияния земли. Сб. «Вопросы рудничного транспорта», вып. 9, М., «Недра», 1965.
2. Амперсекундные характеристики защиты рудничных тяговых сетей от токов короткого замыкания и утечки, опасных в пожарном отношении. «Уголь», 1965, № 3.
3. Электрическое сопротивление тяговых двигателей рудничных электровозов на частоте пульсации выпрямленного тока. Изв. вузов, «Горный журнал», 1968, № 1.
4. Токовременные характеристики защиты рудничных тяговых сетей от токов короткого замыкания и утечки, опасных в пожарном отношении. Сб. «Горная электромеханика и автоматика», вып. 8, Харьков, Изд. ХГУ, 1967.
5. Токи короткого замыкания в рудничных тяговых подстанциях с выпрямителями по схеме трехфазного зигзага. Сб. «Горная электромеханика и автоматика», вып. 10, Харьков, Изд-во ХГУ, 1968.
6. Автоматический выключатель типа АВК для рудничных тяговых сетей (в соавторстве). «Горные машины и автоматика», М., «Недра», 1966, № 12.
7. Штанговые токоприемники рудничным электровозам (в соавторстве) «Уголь Украины», 1967, № 1.
8. Защита шахтных тяговых сетей от токов замыкания на землю (в соавторстве). Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах, выполненных вузами Украины. Киев, 1968.
9. Шахтные электровозы. Глава в справочнике под ред. проф. д. т. н. И. Г. Штокмана «Шахтный транспорт», М. «Недра», 1964.
10. Устройство для защиты рудничных сетей постоянного тока от утечек (в соавторстве). Авторское свидетельство № 181178 от 22 февраля 1966.

Ответственный за выпуск профессор, докт. техн. наук.
Р. М. Лейбов

БП.06760. 17.II-69 г. Формат бумаги $84 \times 108^{1/32}$. Печ. л. 1,68.
Бум. л. 0,84. Заказ 20. Тираж 200.

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