Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXIX вып. 1, 1959 г.

БЕЗОПАСНАЯ ВЕЛИЧИНА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЦЕПЕЙ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

Б. М. Столбов

Одной из задач при внедрении дистанционного управления подземными механизмами, является повышение безопасности эксплуатации электрооборудования. В соответствии с этим такой параметр цепей управления, как величина напряжения, должен приниматься из условия, чтобы, по крайней мере, сами эти цепи не являлись причиной несчастных случаев от поражения электрическим током.

История развития дистанционного управления на отечественных и зарубежных шахтах показывает, что с момента зарождения этого вида управления для цепей управления подземными механизмами применялись напряжения от 10 до 220 *в* переменного тока. Единого мнения о наиболее целесообразной и одновременно обеспечивающей безопасность величине напряжения для таких цепей не существовало, как не существует до сего времени единого мнения о верхнем пределе безопасного напряжения. Так, в Польше, Чехословакии и Швейцарии верхним пределом считается напряжение 50 *в*, в ФРГ — 42 *в*, во Франции — 24 *в*.

Наши Правила безопасности (ПБ) допускают для цепей дистанционного управления подземными механизмами напряжение не выше 36 *в*. Такая величина напряжения сейчас в основном и применяется в этих цепях. Однако, если исходить из соображений истинной безопасности, ее нельзя считать достаточно обоснованной. По данным статистики, поражения током происходят обычно при однополюсных прикосновениях к доступным для окружающих токоведущим частям. Двухполюсные же прикосновения встречаются крайне редко и, согласно утверждению А. И. Кузнецова, не могут служить основанием для оценки сетей с точки зрения безопасности [1]. Установленные пределы безопасных напряжений предполагают, что при таких напряжениях не произойдет поражения током в случае прикосновения человека к открытым, т. е. доступным для окружающих, токоведущим частям.

В цепях же дистанционного управления подземными механизмами непосредственное прикосновение к токоведущим частям практически невозможно, так как они скрыты за массивными оболочками, а сами цепи — кабельные. При вскрытии аппаратуры напряжение с цепи управления снимается в силу наличия блокировки с крышкой. Реальная угроза электрического удара может возникнуть лишь при нарушении

изоляции в цепи, когда напряжение появляется на корпусах аппаратуры управления или оболочках кабелей, а также при случайном прикосновении к токоведущим частям вскрытой с нарушением ПБ аппаратуры управления.

Таким образом, величина напряжения для этих цепей с точки зрения безопасности должна приниматься лишь на основе анализа условий безопасности, ибо степень безопасности электрических сетей в отношении электрического удара устанавливается обычно аналитическим путем. К сожалению, анализа условий безопасности в цепях дистанционного управления подземными механизмами в литературе не приводится.

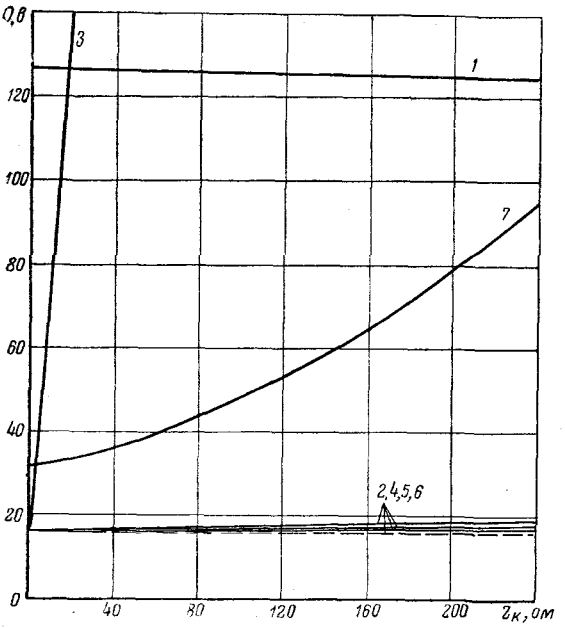


Рис. 1. Напряжение цепей управления, при которых обеспечивается безопасность прикосновения к различным элементам этих цепей:

1 — общий случай однополюсного прикосновения человека к разомкнутой цепи при $R_{из} = 10^4$ *ом*, $c = 0{,}5$ *мкф*; *2* — двухполюсное прикосновение к токоведущим частям цепи; *3* — однополюсное прикосновение к токоведущей жиле цепи, замкнутой на корпус аппаратуры, или к ее корпусу при замыкании на него двух жил, $\cos\varphi = 0{,}1$. Прикосновение к токоведущей жиле при замыкании другой жилы на землю; *4* — при $c \to 0$, $\cos\varphi = 0{,}1$; *5* — при $c = 0{,}5$ *мкф*, $\cos\varphi = 0{,}1$, $R_{из} \to \infty$; *6* — при $R_{из} \neq$ неповрежденной жилы $\cos\varphi = 0{,}1$; *7* — прикосновение к оказавшимся под напряжением аппаратуре управления или кабелю при $l_к = 4$ *км*, $q = 1{,}5$ *мм*^{2}, $\cos\varphi = 0{,}1$

Величина же напряжения, регламентированная ПБ, принята на основе устаревших статистических данных, указывающих на отсутствие случаев поражения людей при напряжениях ниже 40 *в*.

В настоящее время считаются установленными пять важнейших факторов, влияющих на исход поражения током, основным из которых является величина тока. Однако величина тока, который будет проходить через человека в различных случаях прикосновения к элементам цепи управления, зависит от напряжения прикосновения, следовательно, и от напряжения самой цепи.

Произведенный нами математический анализ условий безопасности в цепях дистанционного управления подземными механизмами для всех реально возможных случаев прикосновения к токоведущим частям, а также к корпусам аппаратуры управления и оболочкам кабелей, оказавшимся под напряжением, позволил выявить, что наличие в цепи управления контакторной катушки (промежуточного реле) существенно влияет на условия безопасности. Полное сопротивление этой катушки (реле) во всех этих случаях прикосновения оказывается включенным последовательно в цепи тока через человека и значительно ограничивает этот ток. Данное обстоятельство позволило нам установить такие величины напряжения цепи управления, при которых обеспечивается практически полная безопасность прикосновения к токоведущим частям,

а также к оказавшимся под напряжением элементам цепи. Кривые величин этих напряжений в зависимости от полного сопротивления контакторной катушки (реле) пускателя представлены на сводном графике рис. 1. Приведенные для сравнения кривые *2*, *4*, *5* и *6* соотвествуют случаям прикосновения непосредственно к токоведущим частям цепи, что, как отмечалось выше, практически мало вероятно в условиях цепей дистанционного управления подземными механизмами.

Как видно из рис. 1, при соответствующем значении сопротивления реле пускателя в цепях управления можно применять напряжения, отличные от 36 *в*. Согласно предложению Л. В. Гладилина, сопротивление человека при анализе было принято равным сопротивлению его внутренних органов, как не зависящему от приложенного напряжения, т. е. 800 *ом* [2]. Безопасным считался ток 20 *ма*.

Из всех рассмотренных случаев нами выявлены два наиболее характерных:

1. Прикосновение к оказавшимся под напряжением корпусам аппаратуры управления и оболочкам кабелей при одно- и двухполюсном замыкании на землю в условиях выключенной (разомкнутой) цепи.

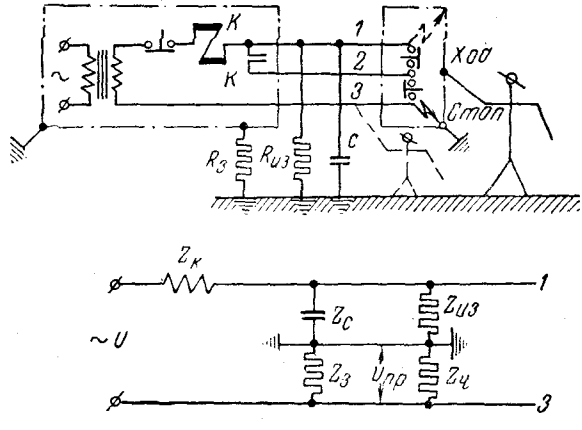


Рис. 2. Принципиальная и расчетная схемы прикосновения при одно- и двухполюсном замыкании на землю. Цепь управления выключена:
1—3 — токоведущие жилы

Принципиальная и расчетная схемы представлены на рис. 2. Поскольку жила *3* кабеля цепи управления замкнута на землю, проводимость изоляции ее можно считать бесконечной ($R_{из} = 0$; $Z_с = 0$). Так как жила *2* электрически по нашему допущению соединена с жилой *3* посредством контактов кнопки «Стоп», вся проводимость изоляции ее сосредоточена в жиле *3*. Такое допущение очень мало влияет на конечный результат расчета.

Эквивалентные сопротивления верхней и нижней параллельных ветвей

$$Z_1 = \frac{Z_с Z_{из}}{Z_с + Z_{из}}; \quad Z_2 = \frac{Z_ч Z_з}{Z_ч + Z_з},$$

где $Z_с$ и $Z_{из}$ — комплекс емкостного и активного сопротивлений изоляции;

$Z_ч$ и $Z_з$ — комплекс сопротивления, соответственно, тела человека и заземления.

Полное сопротивление току

$$Z_п = Z_к + Z_1 + Z_2,$$

где $Z_к$ — комплекс полного сопротивления контакторной катушки (промежуточного реле) пускателя.

Полный ток в цепи

$$I_п = \frac{\dot{U}}{Z_п}.$$

Напряжение прикосновения

$$\dot{U}_{\text{пр}} = \dot{I}_{\text{п}} Z_2.$$

Ток, текущий через человека

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_{\text{пр}}}{Z_{\text{ч}}}.$$

После преобразования

$$\dot{I} = \frac{\dot{U} Z_{\text{з}} (Z_{\text{с}} + Z_{\text{из}})}{Z_{\text{к}} (Z_{\text{ч}} + Z_{\text{з}}) (Z_{\text{с}} + Z_{\text{из}}) + Z_{\text{с}} Z_{\text{из}} (Z_{\text{ч}} + Z_{\text{з}}) + Z_{\text{ч}} Z_{\text{з}} (Z_{\text{с}} + Z_{\text{из}})}.$$

Прикосновение к корпусам аппаратуры управления и оболочке кабеля можно считать практически безопасным, если величина этого тока не превышает 20 *ма*, а величина напряжения цепи управления не превосходит значения

$$\dot{U} = \frac{1}{Z_{\text{з}} (Z_{\text{с}} + Z_{\text{из}})} \{0{,}02 [Z_{\text{к}} (Z_{\text{ч}} + Z_{\text{з}}) (Z_{\text{с}} + Z_{\text{из}}) + Z_{\text{с}} Z_{\text{из}} (Z_{\text{ч}} + Z_{\text{з}}) + Z_{\text{ч}} Z_{\text{з}} (Z_{\text{с}} + Z_{\text{из}})]\} =$$

$$= \frac{1}{50 R_{\text{з}} (R_{\text{из}} - j x_{\text{с}})} [\{(R_{\text{к}} + j x_{\text{к}}) (R_{\text{ч}} + R_{\text{з}}) (R_{\text{из}} - j x_{\text{с}}) - j x_{\text{с}} R_{\text{из}} (R_{\text{ч}} + R_{\text{з}}) + R_{\text{ч}} R_{\text{з}} (R_{\text{из}} - j x_{\text{с}})\}.$$

После соответствующих преобразований получим

$$\dot{U} = \frac{1}{50 R_{\text{з}} (R_{\text{из}} - j x_{\text{с}})} \{R_{\text{из}} [R_{\text{к}} (R_{\text{ч}} + R_{\text{з}}) + R_{\text{ч}} R_{\text{з}}] + x_{\text{к}} x_{\text{с}} (R_{\text{ч}} + R_{\text{з}}) + j \{R_{\text{из}} (R_{\text{ч}} + R_{\text{з}}) (x_{\text{к}} - x_{\text{с}}) - x_{\text{с}} [R_{\text{к}} (R_{\text{ч}} + R_{\text{з}}) + R_{\text{ч}} R_{\text{з}}]\},$$

где $R_{\text{к}}$ и $x_{\text{к}}$ — активное и индуктивное сопротивления контакторной катушки (реле) пускателя;

$R_{\text{из}}$ и $x_{\text{с}}$ — активное и емкостное сопротивления изоляции;

$R_{\text{з}}$ и $R_{\text{ч}}$ — сопротивление, соответственно, заземления и тела человека;

j — мнимая единица.

Абсолютная величина этого напряжения

$$U = \frac{1}{50 R_{\text{з}} \sqrt{R_{\text{из}}^2 + x_{\text{с}}^2}} \{\{R_{\text{из}} [R_{\text{к}} (R_{\text{ч}} + R_{\text{з}}) + R_{\text{ч}} R_{\text{з}}] + x_{\text{к}} x_{\text{с}} (R_{\text{ч}} + R_{\text{з}})\}^2 + \{R_{\text{из}} (R_{\text{ч}} + R_{\text{з}}) (x_{\text{к}} - x_{\text{с}}) - x_{\text{с}} [R_{\text{ч}} (R_{\text{ч}} + R_{\text{з}}) R_{\text{к}} + R_{\text{ч}} R_{\text{з}}]\}^2\}^{\frac{1}{2}}.$$

Поскольку величина сопротивления заземления, согласно требованиям ПБ, не должна превышать 2 *ом*, выражая емкость кабеля в микрофарадах и подставляя значение $R_{\text{ч}} = 800$ *ом*, находим

$$U = \frac{1}{100 \sqrt{R_{\text{из}}^2 + \frac{10^{12}}{\omega^2 c^2}}} \left\{\left[R_{\text{из}} (802 R_{\text{к}} + 1600) + \frac{10^6 x_{\text{к}}}{\omega c} 802\right]^2 + \left[802 R_{\text{из}} \left(x_{\text{к}} - \frac{10^6}{\omega c}\right) - \frac{10^6}{\omega c} (802 R_{\text{к}} + 1600)\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}},$$

где ω — угловая частота тока, *гц*;

c — электрическая емкость кабеля, *мкф*.

После преобразований, имея в виду, что $R_к = Z_к \cos\varphi$, $x_к = Z_к \sin\varphi$, получим

$$U = \frac{1}{\sqrt{R_{из}^2\omega^2c^2 + 10^{12}}} \{8\,[R_{из}\omega c\,(Z_к \cos\varphi + 2) + 10^6 Z_к \sin\varphi]^2 + \\ + [R_{из}\,(\omega c Z_к \sin\varphi - 10^6) - 10^6\,(Z_к \cos\varphi + 2)]^2\}^{\frac{1}{2}}.$$

Анализ этого выражения показывает, что при замыкании на землю только одной жилы прикосновение к корпусам аппаратуры и оболочке кабеля совершенно безопасно; чтобы через человека мог проходить хотя бы безопасный ток 20 *ма*, величина напряжения цепи управления

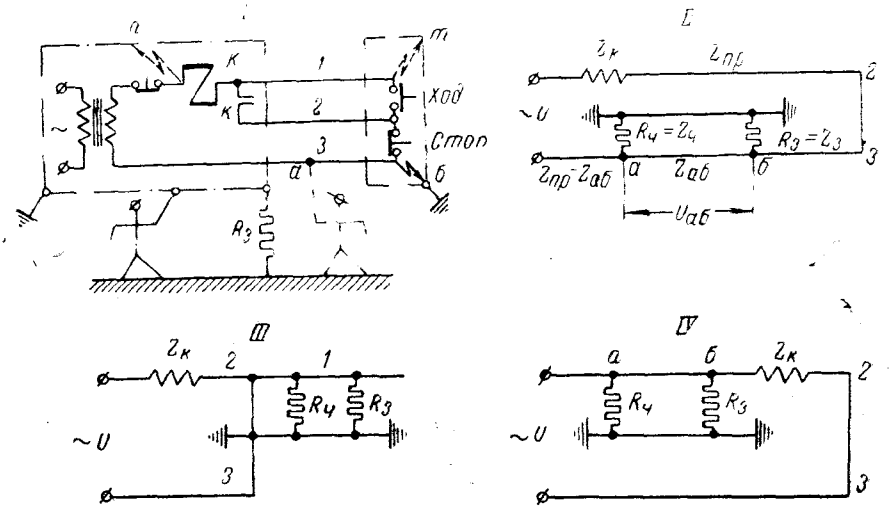


Рис. 3. Схемы прикосновения при однополюсном замыкании на землю в условиях включенной цепи большой протяженности:
I — принципиальная; *II—IV* — расчетные; *1—3* — токоведущие жилы

должна быть большой, даже если проводимость изоляции неповрежденных жил кабеля велика.

При замыкании на землю также и верхней жилы *1* (рис. 2), т. е. при двухполюсном замыкании, безопасность прикосновения может быть обеспечена, если величина напряжения цепи не превышает

$$U = 8\,\frac{\sqrt{10^{12}Z_к{}^2\sin^2\varphi + 10^{12}Z_к{}^2\cos^2\varphi + 4\cdot 10^{12} + 4\cdot 10^{12}Z_к\cos\varphi}}{\sqrt{10^{12}}} = \\ = 8\sqrt{Z_к{}^2 + 4Z_к\cos\varphi + 4} = 8\sqrt{Z_к{}^2 + 4\,(Z_к\cos\varphi + 1)}, \qquad (1)$$

где $\cos\varphi$ — коэффициент мощности контакторной катушки (промежуточного реле) пускателя.

Наглядное представление об этой величине напряжения дает кривая *3* (см. рис. 1). Даже при малом значении полного сопротивления контакторной катушки (реле) пускателя безопасность может быть обеспечена при напряжении, значительно превышающем 36 *в*.

2. Прикосновение к оказавшимся под напряжением корпусам пусковой аппаратуры или оболочке кабеля в условиях включенной цепи большой протяженности.

Этот случай равносилен однополюсному прикосновению к токоведущим частям цепи управления (рис. 3). При небольшой длине цепи

управления опасности электрического удара нет. Однако, если прикосновение человека к цепи происходит на значительном расстоянии от точки замыкания на землю, он может оказаться под действием разности потенциалов между точками *а* и *б*, обусловленной падением напряжения на этом участке цепи (рис. 3, *I*). Если эта разность потенциалов велика, возникает реальная угроза поражения током.

Пусть $Z_{пр}$ — сопротивление жилы кабеля цепи управления длиной l (*км*). При пренебрежении индуктивным сопротивлением кабеля комплекс полного сопротивления контура между точками *а* и *б* (рис. 3, *I* и *II*)

$$Z_1 = \frac{(Z_з + Z_ч)\, Z_{аб}}{Z_з + Z_ч + Z_{аб}},$$

где $Z_{аб}$ — сопротивление отрезка кабеля между точкой замыкания на землю (*а*) и местом прикосновения человека (*б*).

Полное сопротивление току

$$Z_п = Z_к + Z_{пр} + Z_1 + Z_{пр} - Z_{аб} = Z_к + 2Z_{пр} + Z_1 - Z_{аб}.$$

Полный ток в цепи

$$\dot{I} = \frac{U}{Z_п}.$$

Напряжение прикосновения [разность потенциалов между *а* и *б* (рис. 3, *II*)]

$$\dot{U}_{аб} = \dot{I}_ч (Z_ч + Z_з) = \dot{I}_{аб} Z_{аб},$$

где $\dot{I}_{аб}$ — ток, протекающий между точками *а* и *б*;

$\dot{I}_ч$ — ток, текущий через человека;

Согласно закону Кирхгофа,

$$\dot{I}_п = \dot{I}_ч + \dot{I}_{аб}.$$

Ток, протекающий через человека,

$$\dot{I}_ч = \dot{I}_п - \dot{I}_{аб} = \frac{U}{Z_п} - \frac{U_{аб}}{Z_{аб}} = \frac{\dot{U} Z_{аб} - \dot{U}_{аб} Z_п}{Z_п Z_{аб}} = \frac{\dot{U} Z_{аб} - I_ч Z_п (Z_ч + Z_з)}{Z_п Z_{аб}}.$$

Отсюда

$$\dot{I}_ч Z_п Z_{аб} = \dot{U} Z_{аб} - I_ч Z_п (Z_ч + Z_з).$$

Величина напряжения, при которой ток протекающий через человека, не будет превышать 20 *ма*, т. е. прикосновение безопасно,

$$\dot{U} = \frac{\dot{I}_ч Z_п (Z_{аб} + Z_ч + Z_з)}{Z_{аб}} =$$

$$= \frac{0{,}02\, [(Z_к + 2Z_{пр} + Z_1 - Z_{аб})(Z_{аб} + Z_ч + Z_з)]}{Z_{аб}} =$$

$$= \frac{1}{50 Z_{аб}} [Z_к (Z_{аб} + Z_ч + Z_з) + 2Z_{пр} (Z_{аб} + Z_ч + Z_з) -$$

$$- Z_{аб} (Z_{аб} + Z_ч + Z_з) + Z_{аб} (Z_ч + Z_з)] =$$

$$= \frac{1}{50 R_{аб}} [(R_к + jx_к)(R_{аб} + R_ч + R_з) + 2R_{пр} (R_{аб} +$$

$$+ R_ч + R_з) - R_{аб}^2].$$

Очевидно, наиболее опасная разность потенциалов имеет место при $R_{аб}=R_{пр}(Z_{аб}=Z_{пр})$. При определении величины напряжений, обеспечивающей безопасность прикосновения, следует ориентироваться именно на такое соотношение сопротивлений:

$$\dot{U}=\frac{1}{50R_{пр}}[R_к(R_{пр}+R_ч+R_з)+2R_{пр}(R_ч+R_з+R_{пр})-$$

$$-R_{пр}^2+jx_к(R_{пр}+R_ч+R_з)].$$

Абсолютная величина этого напряжения

$$U=\frac{1}{50R_{пр}}\{[(R_{пр}+R_ч+R_з)(R_к+2R_{пр})-R_{пр}^2]^2+$$

$$+x_к^2(R_{пр}+R_ч+R_з)^2\}^{\frac{1}{2}}.$$

Имея в виду, что $R_{пр}=\frac{\rho l_к 10^3}{q}$, а $R_ч=800$ *ом* и $R_з=2$ *ом*, получим

$$U=\frac{1}{50\rho l_к q 10^3}\{[(\rho l_к 10^3+802q)(R_к q+2\rho l_к 10^3)-\rho^2 l_к^2 10^6]^2+$$

$$+q^2x_к^2(\rho l_к 10^3+802q)^2\}^{\frac{1}{2}},$$

где q — сечение жил кабеля, *мм*^{2};

ρ — удельное сопротивление жил кабеля, *ом мм*^{2}*/м*.

После подстановки значений $R_к=Z_к\cos\varphi$, $x_к=Z_к\sin\varphi$ и преобразований получим окончательно

$$U=\frac{1}{50\rho l_к q}\{[qZ_к\cos\varphi(\rho l_к+0{,}8q)+\rho l_к 10^3(\rho l_к+1{,}6q)]^2+$$

$$+q^2Z_к^2\sin^2\varphi(\rho l_к+0{,}8q)^2\}^{\frac{1}{2}}. \qquad (2)$$

Наглядное представление об этой величине напряжения на рис. 1 дает кривая *7*. Она построена для наиболее неблагоприятного случая, когда $q=1{,}5$ *мм*^{2}, $\cos\varphi$ умышленно занижен до 0,1, а $l_к$ достигает 4 *км*. В действительности условия прикосновения бывают обычно более благоприятными. Поэтому прикосновение к цепи при изложенных обстоятельствах безопасно при напряжениях, значительно превышающих пределы, указанные кривой *7*.

Если замыкание на землю произойдет перед контакторной катушкой, например в точке *n*, прикосновение к корпусу пускателя совершенно безопасно, какое бы напряжение ни имела цепь управления, так как падение напряжения между точками прикосновения и замыкания на землю в самом пускателе ничтожно (рис. 3, *I* и *IV*).

Если замыкание на землю произойдет в каком-нибудь месте жилы *I*, прикосновение также безопасно, ибо цепи тока через человека не образуется (рис. 3, *I*, *III*, точка *m*).

При замыкании между зажимами контактной катушки и наличии двухполюсного замыкания на землю в условиях выключенной цепи безопасность прикосновения, согласно формуле (1), может быть обеспечена лишь при напряжении цепи

$$U=8\sqrt{Z_к^2+4(Z_к\cos\varphi+1)}=8\sqrt{0+4(0+1)}=16\ в.$$

Если такое замыкание произойдет в условиях включенной цепи, прикосновение безопасно при напряжении, не превышающем

$$U = \frac{\sqrt{\rho^2 l_к^2 10^6 (\rho l_к + 1{,}6q)^2}}{50\rho l_к q} = \frac{20\,(\rho l_к + 1{,}6q)}{q},\ в.$$

Эта величина напряжения при всех практически возможных длинах цепей управления составляет 32 *в*.

Однако два последних случая являются случаями полного короткого замыкания цепи управления, приводящего к исчезновению в ней напряжения. Они не могут поэтому служить основой для оценки цепи с точки зрения безопасности и для выбора величины напряжения.

Сравнение кривых *3* и *7* на рис. 1 и выражений (1) и (2) показывает, что при одном и том же $Z_к$ в условиях включенной цепи большой

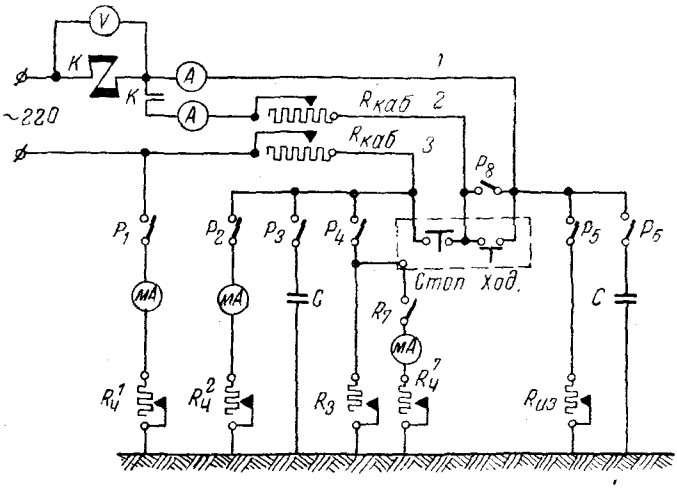


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:
1—3 — токоведущие жилы

протяженности безопасность прикосновения к оказавшимся под напряжением элементам ее может быть обеспечена при значительно меньшем напряжении, чем в условиях выключенной цепи и двухполюсном замыкании на землю. Поэтому, принимая во внимание изложенное выше, выбор величины напряжения для цепей управления подземными механизмами с точки зрения безопасности следовало бы производить, ориентируясь именно на этот случай прикосновения. При соответствующем значении полного сопротивления контакторной катушки (промежуточного реле) величина напряжения для них может приниматься значительно большей 36 *в*.

Учитывая, однако, возможность случайного прикосновения к токоведущим частям цепи при вскрытии аппаратуры управления с нарушением ПБ, следует ограничить эту величину напряжения 127 *в*. Анализ показал, что, если напряжение цепи не превосходит 125—130 *в*, возможно совершенно безопасное однополюсное прикосновение к токоведущим частям ее, даже если проводимость изоляции велика (рис. 1, кривая *1*).

Для цепей управления, заземляющая жила кабеля которых используется в качестве токоведущей, величина напряжения с точки зрения безопасности должна определяться из условия, что человек касается одной из токоведущих частей, ибо одна из них заведомо соединена

с землей. Действительная безопасность в этом случае может быть обеспечена лишь при напряжении цепи, не превышающем 16 *в*.

Проверка выводов анализа условий безопасности производилась нами экспериментальным путем в Лаборатории горной электротехники Ленинградского горного института. Непосредственно определить величину напряжения цепи управления, при которой прикосновение к оказавшимся под напряжением элементам цепи и токоведущим частям является безопасным, не представлялось возможным. Поэтому определялся ток, проходивший через реостат (имитирующий сопротивление тела человека), в различных случаях прикосновения к токоведущим ча-

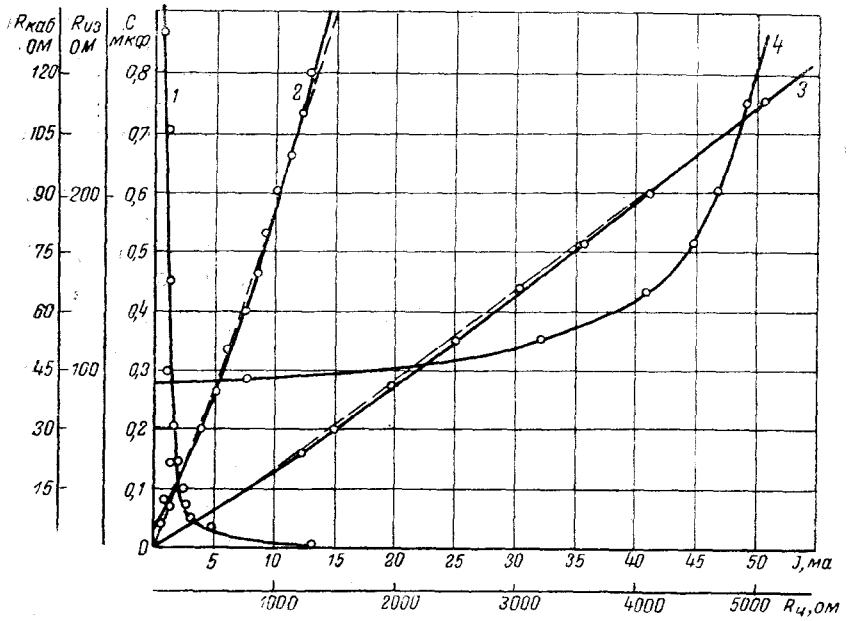


Рис. 5. Экспериментальные кривые величин тока, проходившего через имитирующий сопротивление тела человека реостат $R_ч$ в различных случаях прикосновения

стям и корпусам аппаратуры в условиях выключенной и включенной цепей при напряжении 220 *в*.

В цепи управления (рис. 4) использовался пускатель ПМ-7113. Сопротивление кабеля и заземления имитировалось реостатами $R_{каб}$ и $R_з$, проводимость изоляции — конденсаторами C и реостатами $R_{из}$. Замыкание токоведущих частей на землю или корпус производилось соответствующими рубильниками P. На графике, приведенном на рис. 5, где сведены результаты эксперимента, кривая *1*, построенная в зависимости от $R_{из}$, соответствует случаю прикосновения к корпусу аппаратуры, оказавшемуся под напряжением при одно- и двухполюсном замыкании на землю в условиях выключенной цепи. Кривая *2* $I_ч = f(R_{каб})$ соответствует случаю прикосновения к токоведущей жиле или корпусу аппаратуры при однополюсном замыкании на землю в условиях включенной цепи большей протяженности.

Несмотря на то, что напряжение цепи 220 *в*, величина тока, протекавшего через человека, ни в одном из этих случаев не превышала безопасного значения 20 *ма*. Экспериментально установлено, что при двухполюсном замыкании на землю в условиях выключенной цепи пускатель

автоматически включался и цепь тока, протекающего через человека (реостат $R_ч$) оказывалась шунтированной. Ток через этот реостат не проходил вообще.

Лишь в случае прикосновения непосредственно к токоведущим частям цепи с большей проводимостью изоляции ток, проходящий через человека, превышал безопасное значение 20 *ма*, что и отражает кривая *3* $I_ч = f(C)$. Однако напряжение цепи было при этом 220 *в*, а емкость кабеля выше 0,3 *мкф*. Естественно, что при меньшем напряжении цепи, например при 127 *в*, прикосновение будет безопасным в условиях цепи с большей проводимостью изоляции (следовательно, при емкости кабеля, значительно превышающей 0,3 *мкф*).

На рис. 5 пунктиром изображены кривые величин тока, полученные для аналогичных условий прикосновения расчетным путем. Кривая *4*, полученная экспериментально, показывает, какое должно было бы быть сопротивление тела человека, чтобы через него мог проходить безопасный ток 20 *ма* в условиях однополюсного прикосновения к токоведущим частям цепи.

Таким образом, результаты экспериментов полностью подтверждают все положения теоретического анализа, в том числе и существенное влияние полного сопротивления контакторной катушки (промежуточного реле) пускателя на величину проходящего через человека тока.

Выводы. С точки зрения безопасности в отношении электрического удара для цепей дистанционного управления, заземляющая жила кабеля которых используется в качестве токоведущей, следует применять напряжение не свыше 16 *в*. Для цепей дистанционного управления, заземляющая жила кабеля не используется в качестве токоведущей, возможно напряжение вплоть до 127 *в*.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов А. И. Техника безопасности в электрических установках. Госэнергоиздат, 1952, стр. 64.

2. «Электрооборудование подземных выработок угольных шахт», сб. статей. Углетехиздат, 1955, стр. 285.