

УДК 621.616.13

АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ВНУТРИКАРЬЕРНОГО ТРАНСПОРТА

А. М. ГребенюкГосударственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»
просп. Карла Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49005, Украина. E-mail: andreynmu@mail.ru**А. В. Некрасов**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: ke@kdu.edu.ua, secr@polytech.poltava.ua

Проведен анализ особенностей условий работы и основных причин возникновения аварийных режимов для карьерных тяговых сетей переменного и постоянного тока, рассмотрены аварийные токи в контактной сети постоянного и переменного тока для условий тяговой сети переменного тока напряжением 10,5 кВ Публичного акционерного общества «Полтавский горнообогатительный комбинат» и их влияние на электробезопасность. Приведены результаты исследований аварийных токов при обрыве контактного провода в тяговой сети переменного тока, при обрыве контактного провода в тяговой сети постоянного тока, а также результаты исследований условий электробезопасности при обрыве контактного провода тяговой сети переменного тока. На основании проведенных исследований установлено, что аварийные режимы, вызванные обрывом контактного провода, характеризуются появлением коротких замыканий, замыканий на грунт, а также замыканий на заземляющую сеть карьера вследствие касания оборванным контактным проводом корпуса заземленного технологического оборудования, сопровождаются появлением опасных значений аварийных токов, потенциалов и шагового напряжения, а также возможны аварийные режимы, при которых вероятно несрабатывание штатных средств защиты. Касание оборванного контактного провода заземленного корпуса электрооборудования или технологических машин представляет особую опасность с точки зрения поражения людей электрическим током за счет появления на корпусах потенциалов, значительно превышающих допустимые уровни, особенно для тяговой сети напряжением 10 кВ, при этом значение токов, протекающих через тело человека при отсутствии дополнительных изоляционных средств, значительно превышают кратковременно безопасные уровни.

Ключевые слова: тяговая сеть карьеров, аварийные токи, обрыв контактного провода, электробезопасность.

АНАЛІЗ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ ВНУТРІШНЬОКАР'ЄРНОГО ТРАНСПОРТУ

А. М. ГребенюкДержавний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»
просп. Карла Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49005, Україна. E-mail: andreynmu@mail.ru**А. В. Некрасов**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: ke@kdu.edu.ua, secr@polytech.poltava.ua

Проведено аналіз особливостей умов роботи й основних причин виникнення аварійних режимів для кар'єрних тягових мереж змінного й постійного струму, розглянуто аварійні струми в контактній мережі постійного й змінного струму для умов тягової мережі змінного струму напругою 10,5 кВ Публічного акціонерного товариства «Полтавський гірничозбагачувальний комбінат» та їх вплив на електробезпеку. Наведено результати досліджень аварійних струмів при обриві контактного проводу в тяговій мережі змінного струму, при обриві контактного проводу в тяговій мережі постійного струму, а також результати досліджень умов електробезпеки при обриві контактного проводу тягової мережі змінного струму. На підставі проведених досліджень встановлено, що аварійні режими, викликані обривом контактного проводу, характеризуються появою коротких замикань, замикань на землю, а також замикань на заземлювальну мережу кар'єра внаслідок торкання обірваним контактным проводом корпусу заземленого технологічного обладнання, супроводжуються появою небезпечних значень аварійних струмів, потенціалів і крокової напруги, а також можливі аварійні режими, за якими ймовірно неспрацювання штатних засобів захисту. Торкання обірваного контактного проводу заземленого корпусу електрообладнання або технологічних машин становить особливу небезпеку з точки зору ураження людей електричним струмом за рахунок появи на корпусах потенціалів, що значно перевищують допустимі рівні, особливо для тягової мережі напругою 10 кВ, при цьому значення струмів, що проходять через тіло людини за відсутністю додаткових ізоляційних засобів, значно перевищують короткочасно безпечні рівні.

Ключові слова: тягова мережа кар'єрів, аварійні струми, обрив контактного проводу, електробезпека.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Повреждаемость распределительных сетей и их элементов на открытых горных работах непосредственно связана с надежностью систем электроснабжения и также влияет на уровень электробезопасности.

Контактные сети железных дорог (27,5 кВ), внутрикарьерных на переменном (10,5 кВ) и на постоянном (3,3 кВ) токе работают в сложных условиях. Механическое воздействие токоприемников подвижного состава, запыленность изоляции, вы-

званная прохождением поездов, создают условия для значительно более частого возникновения коротких замыканий (КЗ), чем у обычных воздушных линий того же класса напряжения.

Для карьерных тяговых сетей переменного и постоянного тока к основным причинам возникновения аварийных режимов следует отнести междуфазные короткие замыкания и замыкания контактного провода и отсасывающей линии через землю, металлические части или оборудование железнодорожного состава вследствие обрыва контактного провода. Однако для условий карьера с электрифицированным железнодорожным транспортом возможны и другие, более сложные и более опасные аварийные режимы.

Питание контактной сети железнодорожного транспорта карьеров усложняется в связи с наличием постоянных и передвижных путей, а также наличием зон погрузки, где контактная сеть является смещенной для обеспечения работы погрузочного экскаватора. Именно в этих зонах весьма вероятны следующие повреждения:

- касания контактного провода ковшом экскаватора, который, в свою очередь, соединен с общекарьерной заземляющей сетью;

- замыкание тяговой сети на корпус заземленного карьерного технологического оборудования при обрыве контактного провода [1–5].

Работа контактной сети значительно усложняется в зимних условиях. Низкие температуры, образование гололеда на проводах и действие ветра ухудшают условия токоотбора, а в определенных условиях приводят и к авариям, вызывающим остановку движения. При низких температурах ухудшается работа подвески, увеличивается трение в шарнирах токоприемника и, соответственно, ухудшается токоотбор. При действии ветра, направленного поперек пути, контактный провод может быть вынесен за пределы полоза токоприемника, в результате чего повреждается токоприемник и контактная сеть. В общем случае наиболее опасными являются участки контактной сети, расположенные в степных районах, на высоких насыпях, мостах через большие реки и при подходах к ним. Ветроустойчивость подвески зависит от натяжения проводов и ее конструкции. Применение двойных контактных проводов и косых подвесок – эффективные мероприятия по повышению ветроустойчивости подвески [6–9].

Действие ветра при определенных условиях вызывает, помимо горизонтальных, вертикальные перемещения участков контактной сети, называемые автоколебаниями («пляской») проводов. Они происходят под действием аэродинамических сил, возникающих при обтекании воздушным потоком проводов, у которых в результате износа или отложения гололеда изменилась форма сечения. Эти колебания возникают в открытых местах при скорости ветра 6–10 м/с и могут наблюдаться продолжительное время. Размах колебаний проводов достигает 1 м

(частота собственных колебаний системы – 40–60 периодов в минуту). При сильных автоколебаниях токоприемник не успевает следовать за колебаниями подвески и условия токоотбора ухудшаются. Возможны и механические повреждения подвески. Для предотвращения автоколебаний при проектировании и строительстве предусматривают чередование пролетов различной длины: они различаются на 6–8 м. Колебания можно также прекратить снятием гололеда (электрическая плавка гололеда) [4, 5, 7], повышенным натяжением проводов, подвеской грузов на несущий трос в пролете и другими способами.

Помимо автоколебаний наблюдаются и вибрации проводов, т.е. колебания с малыми перемещениями (амплитуда 0,5–5 см) и вдвое большими частотами. Вследствие быстро меняющихся знакопеременных напряжений в местах крепления провода или выхода из зажима происходит его обрыв.

В системах электроснабжения железнодорожного транспорта наиболее ответственным элементом является контактная сеть. Она не может иметь резерва, поэтому надежность работы пытаются повысить путем секционирования, что позволяет при повреждениях отключать не всю контактную сеть, а поврежденный участок. Карьерные тяговые сети переменного тока на горнообогатительных комбинатах (ГОК) Украины работают в основном на переменном напряжении 10 кВ, и величина тока короткого замыкания существенно зависит от схемы питания и от того, какие выключатели в межподстанционной зоне включены или выключены.

В карьерных тяговых сетях наиболее распространенными повреждениями являются короткие замыкания, вызванные обрывом контактного провода или разрушением изоляторов, а также замыкания на заземляющую сеть карьера при касании ковшом экскаватора контактного провода или касание оборванным контактным проводом корпуса другого заземленного (к общекарьерной заземляющей сети) технологического оборудования. Оба аварийных режима сопровождаются появлением опасных значений аварийных токов, потенциалов и шагового напряжения.

Целью работы является анализ видов аварийных режимов, возникающих в карьерных тяговых сетях, а также исследование токов коротких замыканий и условий электробезопасности при обрыве контактного провода тяговой сети.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.
Исследование аварийных токов при обрыве контактного провода в тяговой сети переменного тока

В тяговой сети переменного тока вычисление установившегося тока КЗ выполняют тем же методом, что и для общепромышленных сетей переменного тока при двухфазном КЗ [10, 11]. Полагая, что питающая подстанция электрическая система является источником неограниченной мощности, вычис-

ляют минимальное значение тока КЗ:

$$I_{k \min}^{(2)} = \frac{U_{nom}}{z_{rez}^{(2)}} \quad (1)$$

Результующее сопротивление цепи КЗ

$$z_{rez}^{(2)} = \sqrt{R_{kl}^2 + \left(2x_s + 2 \frac{x_{tr}}{n_{tr}}\right)^2},$$

где x_s – реактивное сопротивление системы; а его составляющие вычисляются по выражениям:

– для питающей электрической системы

$$x_s = \frac{U_{nom}^2}{S_k};$$

– для силового трансформатора подстанции

$$x_{tr} = u_{k*} \frac{U_{nom}^2}{S_{tr, nom}};$$

– для тяговой сети

$$R_{kl} = r_{kl, ud} l_{kl}; \quad x_{kl} = x_{kl, ud} l_{kl},$$

где n_{tr} – количество трансформаторов подстанции, включенных параллельно.

При выборе уставки срабатывания максимальной токовой защиты должно выполняться условие

$$I_{nmax} k_n \leq I_{ust} \leq \frac{I_{k min}}{k_{ch}}, \quad (2)$$

где k_{ch} – коэффициент чувствительности, принимаемый равным 1,5; k_n – коэффициент надежности, принимаемый равным 1,2–1,3.

При коротком замыкании на величину тока большое влияние оказывает электрическая дуга, возникающая в месте повреждения. При пробое изоляции ее сопротивление составляет 0,1–0,5 Ом. В случае перекрытия гирлянды изоляторов по загрязненной поверхности сопротивление может достигать 0,5–2,5 Ом. При перекрытии нейтральной вставки дуга выдувается ветром до нескольких метров и ее сопротивление возрастает до 5–10 Ом. При этом происходит пережог проводов контактной сети, а в ряде случаев возникают более тяжелые повреждения. В случае обрыва контактного провода и падения на сухую землю или шпальную решетку переходное сопротивление может достигать 20 Ом и более.

Учитывая изложенное, следует отметить, что вероятность невыполнения (2) в условиях карьеров достаточно велика (особенно при обрыве контактного провода), и естественно, что несрабатывание штатных устройств защиты тяговых сетей от коротких замыканий сказывается на надежности элементов тяговой сети и условиях электробезопасности.

Ситуация с обеспечением электробезопасности резко усугубляется при замыкании оборванного контактного провода заземленного технологического оборудования, а также, например, при касании ковшом экскаватора контактного провода в зоне погрузки, происходит замыкание между двумя

фазами тяговой сети через землю и цепи заземляющей сети карьера. Одна фаза (А или С) силового трансформатора тяговой подстанции питает контактный провод, другая (фаза В) – заземлена и соединена с рельсовыми путями.

С другой стороны, экскаваторы питаются от трехфазной сети напряжением 6 кВ, а их корпуса связаны с общей заземляющей сетью карьера.

Как правило, карьерная заземляющая сеть является общей для электроустановок напряжением до и выше 1000 В. Главные заземлители расположены в районе главной понизительной подстанции карьера и соединены с заземляющими тросами, прокладываемыми по опорам карьерных линий электропередачи. Технологическое оборудование (экскаваторы, передвижные подстанции и др.) подключаются к питающей и заземляющей сети с помощью гибких кабелей через приключательные пункты. В соответствии с действующими правилами безопасности они же дополнительно должны также подключаться к местным заземлителям, которые устраиваются в местах расположения приключательных пунктов.

Значение аварийного тока при касании ковшом экскаватора контактного провода при отсутствии нагрузки в тяговой сети в общем случае определяется выражением

$$I_k = \frac{U_n}{Z_{sum}}, \quad (3)$$

где U_n – напряжение питания тяговой сети; Z_{sum} – суммарное сопротивление цепи короткого замыкания, которое определяется не только элементами питающей системы электроснабжения, но и сопротивлениями тяговой сети, переходными сопротивлениями в точке замыкания и сопротивлениями элементов заземляющей сети.

На рис. 1 представлены расчетная схема и схема замещения системы электроснабжения карьерного электровозного транспорта [1, 11]. На схемах отмечены три точки короткого замыкания: 1) в начале тяговой сети (в месте подключения к тяговой сети, питающей и отсасывающей линий); 2) в конце участка тяговой сети (наиболее удаленная точка); 3) точка касания ковшом экскаватора контактного провода тяговой сети (для рассмотрения наиболее тяжелого режима будем считать, что точка касания находится в непосредственной близости к месту подключения питающей и отсасывающих линий).

Для первого случая (точка К₁) суммарное сопротивление определится по выражению

$$Z_{sum1} = \sqrt{(r_{pl} + r_{ol})^2 + \left(2x_c + x_{pl} + x_{ol} + \frac{2x_{tr}}{n_{tr}}\right)^2}, \quad (4)$$

где r_{pl} , x_{pl} – соответственно активное и реактивное сопротивления питающей линии; r_{ol} , x_{ol} – активное и реактивное сопротивления отсасывающей линии; x_c – сопротивление системы; x_{tr} – индуктивное сопротивление силового трансформатора тяговой

подстанции; n_{tr} – количество индуктивных сопротивлений силового трансформатора тяговой подстанции.

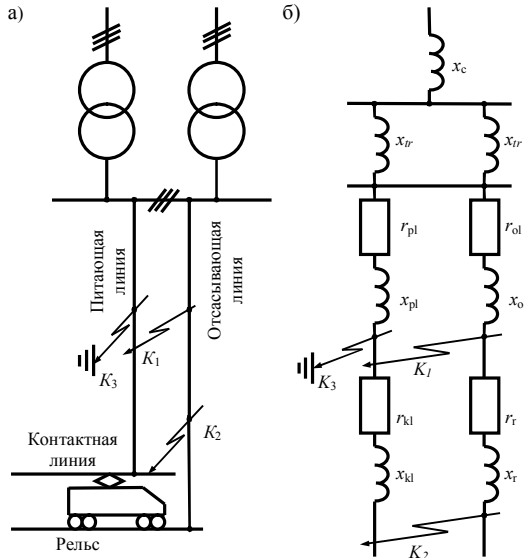


Рисунок 1 – Схемы системы электроснабжения карьерного электровозного транспорта для расчета аварийных токов: а) расчетная схема; б) схема замещения

Активные и индуктивные сопротивления, входящие в выражение (4), определяются в обозначенных единицах в соответствии с [2, 10].

Для второго случая короткого замыкания (точка K_2) суммарное сопротивление цепи короткого замыкания будет равно:

$$Z_{sum2} = \sqrt{(r_{kl} + r_{pl} + r_{ol})^2 + \left(x_{kl} + 2x_c + x_{pl} + x_{ol} + \frac{2x_{tr}}{n_{tr}}\right)^2}, \quad (5)$$

где r_{kl} , x_{kl} – соответственно активное и индуктивное сопротивления контактной линии.

Для случая короткого замыкания при обрыве провода на корпус или при касании ковшом экскаватора контактного провода в районе точки подключения питающей линии к контактной сети (точка K_3) суммарное сопротивление цепи короткого замыкания определится выражением

$$Z_{sum3} = \sqrt{(r_{zs} + r_{pl} + r_{ol})^2 + \left(2x_s + x_{pl} + x_{ol} + \frac{2x_{tr}}{n_{tr}}\right)^2}, \quad (6)$$

где r_{zs} – сопротивление цепи заземления, включая сопротивление грунта перехода от общекарьерного контура заземления до контура заземления тяговой подстанции (фазы B).

При определении значения сопротивления цепи заземления следует учитывать влияние местных заземлителей передвижного электрооборудования, которые включены параллельно сопротивлению общекарьерного контура заземления, т.е.

$$r_z = R_{zu} \frac{R_m}{R_{zu} + R_m}, \quad (7)$$

где R_{zu} – сопротивление общекарьерного заземляющего устройства; R_m – сопротивление местного заземлителя.

При определении минимальных значений аварийных токов короткого замыкания следует учитывать сопротивление электрической дуги в точке K_3 . Токи аварийного режима в этом случае могут быть определены по выражению

$$I_{k.d.} = 0,6 I_k. \quad (8)$$

В табл. 1 приведены расчетные значения токов названных аварийных режимов для условий тяговой сети напряжением 10 кВ Публичного акционерного общества (ПАО) «Полтавский ГОК».

Таблица 1 – Значения токов аварийных режимов

	Ток в точках КЗ, кА		
	K_1	K_2	K_3
Металлические КЗ:			
Число работающих трансформаторов – 2	7,87	5,53	2,84
Число работающих трансформаторов – 1	5,26	4,14	2,21
Дуговые КЗ:			
Число работающих трансформаторов – 2	4,72	3,31	1,70
Число работающих трансформаторов – 1	3,16	2,48	1,33

Исследование аварийных токов при обрыве контактного провода в тяговой сети постоянного тока

В общем случае расчет токов КЗ производят в основном для выбора уставок максимальной токовой защиты, встроенной в коммутационную аппаратуру. В тяговой сети постоянного тока при удаленном коротком замыкании на расстояниях по контактному проводу l_{kl} от питающего пункта

и по рельсовой цепи l_{rl} от отсасывающего пункта минимальное значение установившегося тока КЗ:

$$I_{k min} = \frac{U_{dx} (1 - \delta U_*) - I_{dno} n_{\Gamma a min} \times (R_{nst} + R_L + R_{ol}) - \Delta U_{Pa} - \Delta U_D}{R_{pst} + R_L + R_{ol} + R_{pl} + r_{kl} l_{kl} + r_{pl} l_{pl}}, \quad (9)$$

где U_{dx} – напряжение холостого хода на шинах постоянного тока подстанции; δU_* – допустимое отклонение напряжения в питающей сети внешнего электроснабжения подстанции; I_{dno} – номинальный выпрямленный ток одного преобразовательного агрегата; $n_{pa\ min}$ – минимальное количество рабочих преобразовательных агрегатов; ΔU_{pa} , $\Delta U_{д}$ – потеря напряжения в вентильных плечах преобразовательного агрегата, в дуге в месте КЗ соответственно; R_{nst} , R_{pl} , R_{ol} , R_L – соответственно сопротивления подстанции, питающей и отсасывающей линий, главного реактора в отсасывающей магистрали; r_{kl} , r_{rl} – удельные сопротивления (Ом/км) соответственно контактного провода и рельсовой цепи.

Напряжение холостого хода

$$U_{dx} = U_{dno}(1 + k_{U1} + k_{U2}), \quad (10)$$

где U_{dnom} – номинальное напряжение на шинах постоянного тока подстанции; k_{U1} – коэффициент, учитывающий потерю напряжения в преобразовательных агрегатах,

$$k_{U1} = 0,5u_{\kappa*} + \frac{\Delta P_m}{P_{dnom}} + \Delta U_{pa};$$

k_{U2} – коэффициент, учитывающий потерю напряжения в питающей сети внешнего электроснабжения,

$$k_{U2} = \frac{0,5S_{tr.nom}}{S_k};$$

$u_{\kappa*}$, ΔP_m , $S_{tr.nom}$ – напряжение короткого замыкания, номинальные потери в меди обмоток и номинальная мощность силового трансформатора подстанции; P_{dno} – номинальная мощность преобразовательного агрегата на стороне выпрямленного тока; S_k – мощность КЗ на питающих шинах внешнего электроснабжения подстанции.

Сопротивление подстанции вычисляют в зависимости от количества находящихся в работе вводов высокого напряжения $n_{V\ min}$, количества преобразовательных агрегатов $n_{pa\ min}$ из общего их количества n_V и n_{pa} :

$$R_{pst} = \frac{U_{dno}}{I_{dno}} \left(\frac{k_{U1}}{n_{pa\ min}} + \frac{k_{U2}n_V}{n_{pa}n_{V\ min}} \right). \quad (11)$$

Уставку максимальной токовой защиты $I_{уст}$ принимают из условия (11)

$$I_{ng\ max} + 200 \leq I_{уст} \leq I_{k\ min} - 300, \quad (12)$$

где $I_{ng\ max}$ – наибольшее значение тока нагрузки, А.

Токи фидеров контактной сети постоянного тока в нормальных режимах существенно изменяются, особенно при пуске электроподвижного состава,

при повторном появлении напряжения, при проходе токоприемников через изолирующее сопряжение – воздушный промежуток. Режимы тяговой сети для целей защиты принято в основном характеризовать максимальными токами фидера I_f , бросками токов ΔI , крутизной фронта нарастания тока dI/dt , постоянной времени T , а также уровнем напряжения U в различных точках сети.

При пуске, например, восьмиосных электровозов ток достигает 2100–2250 А. Изменение схемы соединения двигателей сопровождается бросками тока до 900–1000 А. Скорость изменения тока в начальный момент в этом режиме составляет для электровозов примерно 30 кА/с. В эксплуатации происходят отрывы токоприемников локомотивов от контактных проводов, что равносильно кратковременному исчезновению напряжения и повторному его появлению. Такое же явление наблюдается при отключении фидера защитой (например, от перегрузки) и его повторном включении устройствами автоматического повторного включения. В случае повторного появления напряжения возникают броски токов переходного режима, значение которых зависит от длительности перерыва питания. При отрывах токоприемников броски тока достигают 500 А и имеют крутизну фронта 60–80 кА/с. Если перерыв питания длится более 0,5 с, то, например, бросок тока восьмиосного электровоза возрастает в несколько раз.

При проезде воздушных промежутков токоприемник локомотива замыкает обе его ветви. В этот момент ток поезда, ранее протекавший по одному фидеру, питающему набегающую ветвь изолирующего сопряжения, распределяется между двумя фидерами. После прохода воздушного промежутка весь ток поезда будет протекать через второй фидер, питающий сбегающую ветвь изолирующего сопряжения. Таким образом, для второго фидера процесс прохода воздушного промежутка токоприемником сопровождается двумя бросками тока. Бросок тока равен половине тока локомотива и может достигать 1000 А при крутизне фронта 1000–1500 кА/с.

Чем больше ток КЗ по сравнению с током нагрузки, тем легче обнаружить короткое замыкание. При коротком замыкании в тяговой сети постоянно тока с сопротивлением R_k и индуктивностью L_k ток в ней изменяется по закону

$$i_k = I_n + (I_k - I_n)(1 - e^{-t/T_k}) = I_n + \Delta I(1 - e^{-t/T_k}), \quad (13)$$

где i_k – ток нагрузки, предшествующий моменту короткого замыкания; I_k – установившееся значение тока КЗ; $\Delta I = I_k - I_n$ – бросок тока; T_k – постоянная времени ($T_k = L_k/R_k$).

Крутизна нарастания тока равна скорости его изменения в начальный момент времени ($t = 0$):

$$\frac{di_k}{dt} = \left(\frac{di_k}{dt} \right)_{\max} = \left(\frac{\Delta I}{T_k} e^{-t/T_n} \right)_{t=0} = \frac{\Delta I}{T_k}. \quad (14)$$

В реальных условиях закон изменения тока фидера отличается от экспоненты в связи с нелинейностью сопротивления рельсов и влияния переходных процессов в силовой цепи электровоза.

Исследование условий электробезопасности при обрыве контактного провода тяговой сети

Обрыв контактного провода в карьерной тяговой сети, естественно, связан с резким ухудшением условий безопасности. При этом степень опасности возрастает с ростом применяемого в тяговой сети напряжения. Так же, как и в распределительных сетях, при обрыве провода тяговой сети поражение человека возможно действием тока при непосредственном касании упавшего провода, шагового напряжения, напряжения прикосновения к корпусам заземленных электрооборудования и технологических машин при попадании оборванного провода на металлические конструкции или машины. В первых двух случаях степень опасности при прочих равных условиях определяется уровнем напряжения карьерной тяговой сети, и, естественно, тяговые сети переменного тока (10 кВ) представляют большую угрозу, чем сети постоянного тока (3,3 кВ).

Касание оборванного контактного провода заземленного корпуса электрооборудования или технологических машин представляет особую опасность с точки зрения поражения людей электрическим током за счет появления на корпусах электрооборудования потенциалов, значительно превышающих допустимые уровни, особенно для тяговой сети напряжением 10 кВ. Положение усугубляется тем, что опасные потенциалы появляются не только на корпусе участвующего в аварийной ситуации экскаватора, но и на корпусах машин и установок, удаленных от места аварии на значительные расстояния, но подключенных к общекарьерной заземляющей сети.

В общем случае напряжение прикосновения на корпусе любого электрооборудования (выносных потенциалов) определяется сопротивлением перехода «корпус–земля» и значением протекающего по нему тока. Значения выносных потенциалов зависят, в первую очередь, от значения аварийного тока, а также от сопротивлений проводников заземляющей сети, сопротивлений местных и главного заземлителей и места подключения корпуса к заземляющей сети (по отношению к месту аварии). В соответствии с изложенным, напряжение относительно земли на корпусе оборудования (например, экскаватора в зоне погрузки) в режиме касания корпуса оборванным контактным проводом будет равно:

$$U_e = I_{ke} R_e, \quad (15)$$

где I_{ke} – часть тока короткого замыкания, протекающая через переход «корпус экскаватора–земля»; R_e – переходное сопротивление «экскаватор–земля», которое рассматривают как сопротивление полусферического электрода с опорной поверхностью эквивалентного диаметра [3, 5].

Опорная поверхность экскаватора представляет собой прямоугольные пластины, лежащие на поверхности земли. Плоскую прямоугольную пластину можно заменить круглой эквивалентного диаметра:

$$d_{ek} = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}, \quad (16)$$

где F – площадь опорной поверхности экскаватора.

Тогда переходное сопротивление «экскаватор–земля» будет равно

$$R_e = \frac{\rho}{\pi d_{ek}}, \quad (17)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, на котором стоит экскаватор.

С учетом того, что корпус экскаватора соединен также с общекарьерной заземляющей сетью с сопротивлением R_c , которое включено параллельно сопротивлению R_e , можно определить значения части тока короткого замыкания, стекающего в землю через экскаватор:

$$I_{ke} = \frac{I_k R_c}{R_c + R_e} \quad (18)$$

и заземляющую сеть:

$$I_{kc} = \frac{I_k R_e}{R_c + R_e}, \quad (19)$$

где I_k – полный ток аварийного режима КЗ при касании ковшом экскаватора контактного провода тяговой сети.

При этом напряжение относительно земли на корпусе оборудования, которого коснулся оборванный провод тяговой сети, определится выражением

$$U_e = \frac{I_k R_c R_e}{R_c + R_e}. \quad (20)$$

Протекание и распределение тока короткого замыкания по элементам карьерной заземляющей сети показано на рис. 2. В соответствии с этим рисунком напряжения прикосновения (напряжения относительно земли) в различных точках заземляющей сети (на корпусах различного электрооборудования, подключенного к заземляющей сети) определяются по следующим выражениям:

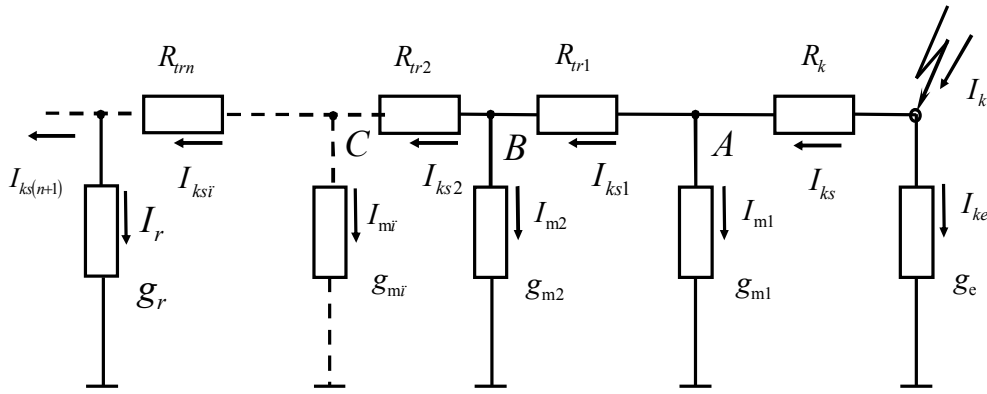


Рисунок 2 – Распределение аварийных токов по заземляющей сети при касании оборванного контактного провода корпуса экскаватора

– на корпусе приключательного пункта, участвующего в аварии экскаватора (в точке *A* рис. 2):

$$U_A = U_e - I_{ks} R_k, \quad (21)$$

где R_k – сопротивление заземляющей жилы экскаваторного кабеля;

– на корпусе приключательного пункта, установленного в точке *B* (рис. 2):

$$U_B = U_A - I_{ks1} R_{tr1}, \quad (22)$$

где I_{ks1} – часть полного тока короткого замыкания, протекающего по заземляющему тросу от приключательного пункта (точка *A*) в сторону главного заземлителя; R_{tr1} – сопротивление заземляющего троса от приключательного пункта аварийного экскаватора до приключательного пункта в точке *B*.

В свою очередь,

$$I_{ks1} = \frac{I_{ks} R_{m1}}{R_{m1} + R_{s1}},$$

где R_{m1} – сопротивление заземления местного заземлителя у приключательного пункта в точке *B*; R_{s1} – сопротивление оставшейся части заземляющей сети карьера;

– на корпусе приключательного пункта, установленного в точке *C* (рис. 2):

$$U_C = U_B - I_{ks2} R_{tr2}, \quad (23)$$

где R_{tr2} – сопротивление участка заземляющего троса от точки *B* до точки *C*; I_{ks2} – часть полного тока КЗ, протекающего по указанному участку заземляющей сети и определяемого из выражения

$$I_{ks2} = \frac{I_{ks1} R_{m2}}{R_{m2} + R_{s2}};$$

– на главном заземлителе (или в *n*-той точке заземляющей сети):

$$U_G = U_C - I_{ksp} R_{trn} \quad (24)$$

или

$$U_n = U_{n-1} - I_{ksn} R_{trn}, \quad (25)$$

где
$$I_{ksn} = \frac{I_{ks(n-1)} R_{mn}}{R_{mn} + R_{sn}}.$$

Используя приведенную методику, можно определить потенциалы на корпусе любого оборудования, подключенного к заземляющей сети карьера в режиме касания корпуса заземленного оборудования (экскаватора) оборванным контактным проводом тяговой сети карьера.

Выполненные расчеты показывают, что для условий ПАО "Полтавский ГОК" (напряжение тяговой сети 10 кВ) выносные потенциалы, исходя из реальных значений аварийных токов при рассматриваемом повреждении (табл. 1), составляют порядка 3–5 кВ. При этом ненормируемое значение сопротивления местного заземления принималось равным 30 Ом (нормируемое по условиям защиты от грозовых перенапряжений).

Одним из возможных методов снижения выносных потенциалов на корпусах машин и установок является соединение корпуса работающего на погрузке экскаватора с тоководущим рельсом. При этом сопротивление соединительного проводника R_{cn} должно выбираться в соответствии с условием

$$R_{cn} = \frac{R_s U_{pr.dop}}{U_{k.s}}, \quad (28)$$

где $U_{pr.dop}$ – допустимое напряжение прикосновения в соответствии с [4, 9]; $U_{k.s}$ – напряжение контактной сети.

Следует отметить, что указанное мероприятие противоречит действующим Правилам безопасности и достижение приемлемых условий безопасности может быть достигнуто применением защитного отключения на основе высокочувствительных средств защиты при касании ковшом экскаватора контактного провода тяговой сети.

ВЫВОДЫ. 1. В карьерных тяговых сетях аварийные режимы, вызванные обрывом контактного провода, характеризуются появлением коротких замыканий (касание рельса или корпуса думпкара), замыканий на грунт или на заземляющую сеть карьера

вследствие касания оборванным контактным проводом корпуса заземленного (подключенного к общекарьерной заземляющей сети) технологического оборудования, а также сопровождаются появлением опасных значений аварийных токов, потенциалов и шагового напряжения, что сказывается на надежности элементов тяговой сети и условиях электробезопасности, особенно при возможном несрабатывании в таких режимах штатных устройств защиты.

2. Анализ работоспособности средств защиты показал, что возможны аварийные режимы, при которых вероятно несрабатывание штатных средств защиты от аварийных режимов в тяговой сети.

3. При непосредственном прикосновении человека к проводнику разорванной фазы со стороны электроприемника, как и при прикосновении к токоведущим частям распределительной сети в любом другом месте при напряжении сети 6 кВ и более, вероятность смертельного исхода с учетом реальных параметров изоляции и времени действия коммутационных аппаратов практически равна единице; значение токов, протекающих через тело человека, при рассматриваемом повреждении в случае отсутствия дополнительных изоляционных средств значительно превышают кратковременно безопасные значения токов.

4. Касание оборванного контактного провода заземленного корпуса электрооборудования или технологических машин представляет особую опасность с точки зрения поражения людей электрическим током за счет появления на корпусах потенциалов, значительно превышающих допустимые уровни, особенно для тяговой сети напряжением 10 кВ; опасные потенциалы появляются не только на корпусе участвующего в аварийной ситуации экскаватора, но и на корпусах машин и установок, удаленных от места аварии на значительные расстояния, но подключенных к общекарьерной заземляющей сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азарьев Д.И. Математическое моделирование электрических систем. – М.–Л.: ГЭИ, 1962. – 207 с.
2. Анастасиев П.И. Электрические сети энергоемких предприятий. – М.: Энергия, 1971. – 344 с.
3. Бельх Б.П., Заславец Б.И. Распределительные электрические сети рудных карьеров. – М.: Недра, 1978. – 239 с.
4. Бургедорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 399 с.
5. Бухтояров В.Ф., Маврицын А.В. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров. – М.: Недра, 1986. – 184 с.
6. Гребенюк А.Н. Влияние метеорологических факторов на работу контактной сети // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. збірник. – 2006. – Вип. 77. – С. 45–49.
7. Гребенюк А.Н. Промышленная контактная сеть и способ защиты от коротких замыканий // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. збірник. – 2007. – Вип. 79. – С. 32–35.
8. Звездкин М.Н. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1974. – 168 с.
9. Инструкция по безопасной эксплуатации электрооборудования и электросетей на карьерах. – М.: Недра, 1982. – 80 с.
10. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Электрооборудование и автоматизация / Т.В. Анчарова, В.В. Каменева, А.А. Катарская; под общ. ред А.А. Федорова и Г.В. Сербиновского. – М.: Энергоиздат, 1981. – 624 с.
11. Фигурнов Е.П. Релейная защита: учебник для студентов электротехнических и электромеханических специальностей транспортных и других вузов. – К.: Транспорт Украины, 2004. – 565 с.

THE ANALYSIS OF CATENARY EMERGENCY OPERATION OF IN-PIT TRANSPORT

A. Grebeniuk

State Higher Educational Institution "National Mining University"
prosp. Karla Marksa, 19, Dnepropetrovsk, 49005, Ukraine. E-mail: andreynmu@mail.ru

A. Nekrasov

Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: ke@kdu.edu.ua, secr@polytech.poltava.ua

The analysis of working conditions features and the main causes of emergency operation for mining traction networks AC and DC fault currents considered in the catenary AC and DC traction conditions for an AC voltage of 10.5 kV Public Joint Stock Company "Poltava Ore Mining and Processing Plant" and their effect on electrical safety. The results of studies on loss of fault currents in the contact wire traction AC a break in the trolley wire traction network DC, as well as the results of studies on loss of electrical conditions of the contact wire AC traction. Based on the studies found that the emergency operation caused by breakage of the contact wires are characterized by the appearance of short-circuit, short to ground, and a ground-fault network career due to touch ragged contact wire grounded housing technological equipment, accompanied by the emergence of dangerous levels of fault currents, potentials and stepper voltage and possible failure mode in which the probability of failure of standard remedies. Touch ragged contact wire grounded housing electrical or technological machines is especially dangerous from the point of view of electric shock due to the appearance on the hulls of the potential is much higher than permitted levels, especially for traction network voltage of 10 kV, and the value of current through the human body in the absence of additional insulation funds are much higher than short-term safe levels.

Key words: in-pit traction network, emergency currents, break of contact wire, electrical safety.

REFERENCES

1. Azaryev, D.I. (1962), *Matematicheskoe modelirovaniye elektricheskikh sistem* [Mathematical modeling of electrical systems], GEI, Moscow, Leningrad. (in Russian)
2. Anastasyev, P.I. (1971), *Elektricheskie seti energoemkikh predpriyatiy* [Electrical network-intensive enterprises], Energiya, Moscow. (in Russian)
3. Belyh, B.P. and Zaslavets, B.I. (1978), *Raspredelitelnye elektricheskie seti rudnykh karyerov* [Power Distribution Networks of the Ore Quarries], Nedra, Moscow. (in Russian)
4. Burgedorf, V.V. and Jacobs, A.I. (1987), *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Electrical grounding devices], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
5. Bukhtoyarov, V.F. and Mavritsyn, A.V. (1986), *Zashchita ot zamykaniy na zemlyu elektroustanovok karyerov* [Protection against earth fault electrical quarries], Nedra, Moscow. (in Russian)
6. Grebenyuk, A.N. (2006), "Influence of meteorological factors on the work of the contact network", *Girnycha elektromekhanika ta avtomatyka*, no. 77, pp. 45–49. (in Russian)
7. Grebenyuk, A.N. (2007), "Industrial network of contacts and a way to protect against short circuits", *Girnycha elektromekhanika ta avtomatyka*, no. 79, pp. 32–35. (in Russian)
8. Zvezdkin, M.N. (1974), *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power supply of electrified railways], Transport, Moscow. (in Russian)
9. *Instruktsiya po bezopasnoy ekspluatatsii elektrooborudovaniya i elektrosetey na karyerakh* [Instructions for the safe operation of electrical equipment and power grids in the quarries] (1982), Nedra, Moscow. (in Russian)
10. Ancharova, T.V., Kamenev, V.V. and Kataruskaya, A.A. (1981), *Spravochnik po elektrosnabzheniyu promyshlennykh predpriyatiy: Elektrooborudovaniye i avtomatizatsiya* [Handbook of industrial power: Electrical and Automation], Energoizdat, Moscow. (in Russian)
11. Figurnov, E.P. (2004), *Releynaya zashchita* [Protective relaying], Transport Ukrainy, Kiev. (in Russian)

Стаття надійшла 18.04.2015.