

count the environmental conditions and use 1140 voltage level for mining complexes power supply. The necessity of operating mode monitoring providing with the averaging interval of the 2.5 minute has been proved. These findings allow us to use TS effectively and to replace them for the reason of factual state deterioration before the equipment failure happens. This will provide an opportunity to form the TS park rationally.

**Originality.** The universal dependence of TS load capacity on environmental factors influence has been established. Conditions for existing power reserves of the explosion-proof TS load capacity extraction have been determined.

**Practical value.** Received dependences and determined conditions of TS load capacity use will allow assessing factual and forecasting residual life of e substation. It will be useful for optimal TS park forming in coal mine and up-to-date data bases concerning mining complexes operation modes implementation. It will allow developing principles of electric loads calculations for this equipment type and specific exploitation conditions.

**Keywords:** *explosion-proof factory-assembled transformer substation, load capacity, environmental conditions, insulation deterioration, optimal park, monitoring*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Ю.Т. Разумним. Дата надходження рукопису 05.07.12.*

УДК 622.62-83:621.33

Е.И. Хованская, канд. техн. наук, доц.,  
Ю.А. Папаика, канд. техн. наук,  
А.Г. Лысенко

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина,  
e-mail: hovansky@omp.dp.ua

## ИСКРОБЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРИ ОТКАТКЕ БЕСКОНТАКТНЫМИ ЭЛЕКТРОВОЗАМИ

Ye.I. Khovanskaya, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,  
Yu.A. Papaika, Cand. Sci. (Tech.),  
A.G. Lysenko

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine,  
e-mail: hovansky@omp.dp.ua

## SAFETY OF ELECTRIC CHAINS DURING THE USE OF CONTACTLESS ELECTRIC LOCOMOTIVES

**Цель.** Целью данной работы является оценка параметров, оказывающих влияние на искробезопасность проводников, расположенных в подземной выработке.

**Методика.** Методика исследований основана на теории электротехники при использовании способов высокочастотной передачи энергии на электровоз.

**Результат.** Результаты работы показывают, что характеристики искробезопасных зон изменяются в зависимости от ряда факторов, в том числе режима работы тяговой сети и расположения проводников в выработке. Искробезопасность посторонних проводников в зоне действия тяговой сети может быть достигнута при учете параметров прокладки рельсов и кабелей тяговой сети. Получены зависимости для определения искробезопасного шага транспозиции для двухпутевой и однопутевой выработок, отличающихся выражением для определения взаимной индукции, которые могут быть использованы при любом взаимном расположении кабелей тяговой сети и посторонних проводников. Полученные результаты являются основой для построения алгоритмов расчета искробезопасного шага транспозиции при двухпутевой и однопутевой выработках.

**Научная новизна.** Значения искробезопасного шага транспозиции для горных выработок транспорта с индуктивной передачей энергии определяются при учете режимных параметров тяговой сети; определены условия, при которых обеспечивается искробезопасность.

**Практическая значимость.** Полученные зависимости определения искробезопасного шага позволяют определить безопасные для эксплуатации зоны расположения посторонних проводников в поле влияния тяговой сети подземного транспорта.

**Ключевые слова:** *транспорт с индуктивной передачей энергии, тяговая сеть, посторонние проводники, искробезопасность*

**Актуальность работы.** Угольная отрасль является приоритетной для энергетики Украины. Одним из крупных потребителей электроэнергии на угольных шахтах считается подземный транспорт. Современные шахты широко используют конвейерный транспорт,

однако рельсовый транспорт остается востребованным, в частности, при транспортировании людей, вспомогательных материалов, оборудования. Одним из перспективных направлений в развитии рельсового транспорта является применение высокочастотных электровозов, обеспечивающих безискровой токосъем. Научную школу, ведущую разработки

в этом направлении, возглавляет академик НАН Украины Г.Г. Пивняк.

**Актуальность темы и постановка задачи.** Одним из основных элементов системы электроснабжения высокочастотных электровозов является тяговая сеть, которая передает им энергию путем электромагнитной индукции без непосредственного контакта [1]. Однако безискровой током не исключает возникновения опасных ситуаций в горной выработке, где могут находиться и другие проводники. Таким образом, обеспечение искробезопасности посторонних проводников в зоне влияния тяговой сети – актуальная научно-техническая задача.

**Анализ результатов последних исследований.** В процессе создания комплекса транспорта с индуктивной передачей энергии (при использовании высокочастотных электровозов) были всесторонне исследованы различные аспекты, связанные с режимами электропотребления [1–3], в том числе и некоторые вопросы взаимодействия тяговой сети и посторонних проводников, находящихся в подземной выработке [1]. Однако остаются неизученными некоторые моменты, связанные с расположением искробезопасных зон при различных режимах работы тяговой сети.

**Цель и задачи исследований.** Задачей данной работы ставится оценка параметров, оказывающих влияние на искробезопасность проводников, расположенных в подземной выработке.

**Изложение основного материала.** Как отмечалось выше, в подземных выработках в зоне влияния тяговой сети могут располагаться посторонние проводники. На посторонний проводник воздействуют поток магнитной индукции и напряженность электрического поля, создаваемые током тяговой сети. При этом в нем возникает электродвижущая сила (ЭДС), индуцируемая током тяговой сети. При работе транспорта с индуктивной передачей энергии возникает электромагнитное поле, в котором составляющая электрического поля такова, что допустимо полагать наведение ЭДС в посторонних проводниках следствием только возникновения магнитного поля. Поэтому при исследовании искробезопасности электрических цепей, образующихся в подземной выработке, учитываются только параметры магнитного поля. Посторонние проводники образуют электрические контуры, которые вследствие воздействия тока тяговой сети могут стать искроопасными. Это, например, контуры, образованные броней кабеля постороннего проводника и землей, броней кабеля и трубопроводом, рельсовыми путями, и др. Искробезопасность посторонних контуров определяется, исходя из параметров установившегося режима [1], однако неизвестно, как на нее влияют переходные процессы в тяговой сети. Специфика последних обуславливает появление высших гармонических составляющих и другие явления, способные изменить условия искробезопасности посторонних проводников. В связи с этим, руководствуясь целью повышения безопасности эксплуатации транспорта с индуктивной передачей энергии, важно оценить влияние

переходных процессов в тяговой сети на искробезопасность посторонних проводников.

Оценка искробезопасности для различных видов контуров, образованных посторонними проводниками, при установившемся режиме работы тяговой сети, показывает, что наиболее опасным является контур, образованный броней кабеля и землей [1]. Для исключения искроопасности посторонних контуров в тяговой сети применяется транспозиция ее кабелей. Искробезопасный шаг транспозиции – максимально допустимое расстояние между пунктами транспозиции, при котором не возникают искроопасные токи, рассчитывается, исходя из параметров наиболее опасного контура. В качестве исходных данных для расчета используются результаты маркшейдерских замеров, выполненных на фиксированных участках выработки. Ими являются:  $c$  – зазор между кромкой подвижного состава и вертикальной осью постороннего проводника;  $d$  – высота подвески кабеля постороннего проводника над головкой рельс;  $d_1$  – расстояние между горизонтальными осями кабелей тяговой сети и постороннего проводника (рис. 1).

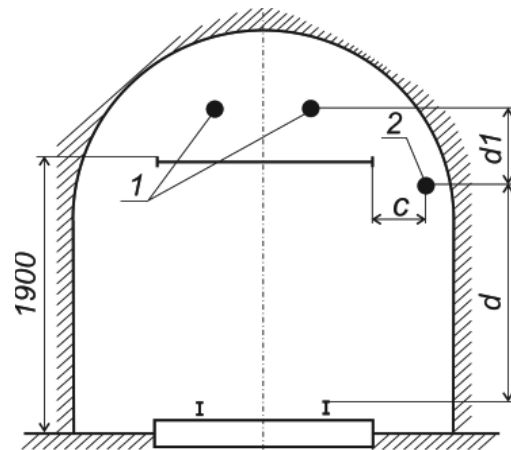


Рис. 1. Расположение тяговой сети и постороннего проводника в сечении однопутевой выработки: 1 – кабели тяговой сети; 2 – посторонний проводник

Критерием для оценки искробезопасности постороннего контура является искробезопасный ток  $I_{II}$ , который устанавливается по минимальному воспламеняющему току  $I_B$  и коэффициенту искробезопасности  $K_{II}$ . Посторонний контур считается искробезопасным, если максимально возможный в нем ток короткого замыкания  $I_{K3}$  меньше искробезопасного

$$I_{K3} < I_{II} = I_B / K_{II}, \quad (1)$$

где  $I_{K3}$  – ток короткого замыкания;  $I_{II}$  – искробезопасный ток;  $I_B$  – воспламеняющий ток;  $K_{II}$  – коэффициент искробезопасности.

Ток  $I_{K3}$  определяется отношением напряжения, наводимого тяговой сетью в контуре, и полного сопротивления этого же контура. ЭДС, индуцируемая тяговой сетью, определяется соотношением

$$E = -jI\omega M,$$

где  $I$  – ток в тяговой сети;  $\omega$  – угловая частота;  $M$  – взаимная индуктивность тяговой сети и участка постороннего контура, которая определяется, исходя из расположения кабелей тяговой сети и постороннего проводника.

Минимальный воспламеняющий ток является функцией напряжения и индуктивности постороннего контура, которая, в свою очередь, зависит от частоты [1]. При рассмотрении искробезопасности посторонних контуров в установившемся режиме использованы графические зависимости воспламеняющего тока для основной гармоники частоты, определяющей соответствующие параметры контура, в частности, его индуктивность. В переходном процессе изменяется распределение тока по сечению проводников, образующих контур, и, соответственно, изменяется распределение в пространстве магнитного потока, сцепленного с контуром, а, следовательно, изменяется и индуктивность контура. При синусоидальном токе индуктивность является функцией угловой частоты тока, а при несинусоидальном периодическом – она является еще и функцией формы кривой тока. Очевидно, в этом случае минимальный воспламеняющий ток должен определяться зависимостью для более высоких частот. Следовательно, изменение формы кривой тока тяговой сети в переходных процессах и появление высших гармонических составляющих обуславливает необходимость оценки влияния этих факторов на расчет искробезопасного шага транспозиции. Выполнить такую оценку возможно на основании исследования искробезопасных зон при работе тяговой сети в различных режимах.

Исследование пускового режима – одного из переходных режимов работы тяговой сети, проведенное ранее [2, 3], показывает, что значения тока тяговой сети при пуске всегда меньше установившихся. При этом изменяются значения наводимых ЭДС, определяемые в соответствии с (1), и создаваемых ими токов  $I_{K3}$ , а также воспламеняющих токов. Изменения параметров посторонних контуров наблюдаются и в результате сброса нагрузки от электровозов. Исходя из этих предпосылок, необходимо построить искробезопасные зоны для посторонних контуров, используя параметры переходных режимов, и сравнить их с зонами, полученными для установившегося режима.

Поскольку индуктивности при неизменности всех прочих условий (магнитной проницаемости, удельной проводимости вещества провода) зависят от частоты, появление высших гармонических составляющих в переходных процессах требует применения иных зависимостей для расчета собственной индуктивности контура. Так как поверхностный эффект и эффект близости при прочих равных условиях выражены тем резче, чем выше частота тока, то при расчете индуктивностей различают случаи постоянного

тока и низкой частоты, высокой и сверхвысокой частот. Стабилизация значения тока тяговой сети в установившемся режиме допускает использование в расчете искробезопасного шага транспозиции выражений для случая низкой частоты. В переходном процессе такое допущение неприемлемо, поскольку при этом распределение тока по сечению проводника не будет равномерным и изменится вид зависимости, определяющей значение воспламеняющего тока, аргументами которой являются наводимое в контуре напряжение и его собственная индуктивность. Поэтому расчет собственных индуктивностей посторонних проводников для определения искробезопасного шага транспозиции, с учетом переходных процессов в тяговой сети, необходимо выполнять, исходя из допущения, что переходный процесс соответствует случаю высокой частоты.

При расчете тока короткого замыкания  $I_{K3}$  параметрами, зависящими от частоты, являются ЭДС, наводимая тяговой сетью на участке постороннего контура, полное сопротивление этого участка и его индуктивность. ЭДС, вычисляемая из выражения (1), зависит от угловой частоты  $\omega$  и взаимной индуктивности, которая определяется параметрами расположения постороннего контура и тяговой сети. Для оценки влияния режимов работы тяговой сети на искробезопасность посторонних контуров необходимо обозначить зависимости, которыми определяются вышеперечисленные параметры.

При получении расчетных зависимостей для установившегося режима приняты допущения: постоянными являются частота  $f$ ; проводимость земли  $g_3$ ; магнитные проницаемости материалов  $\mu$ ; толщина брони; ширина ленты для шахтных кабелей [1]. Для расчета индуктивности контура при этом использовано выражение

$$L_K = \mu_0 \cdot \frac{1}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{2l}{rs} \right) - 1 \right),$$

где  $L_K$  – индуктивность контура;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $l$  – длина постороннего проводника;  $r$  – внешний радиус поперечного сечения постороннего проводника;  $s$  – коэффициент, учитывающий соотношение внутреннего и внешнего радиусов постороннего проводника.

Взаимная индуктивность  $M$ , которая при любых частотах определяется одинаковыми выражениями [1], зависит от того, выполнена тяговая сеть двумя или четырьмя кабелями (одно- или двухпутевая выработка). Направление протекания тока в кабелях тяговой сети при двухпутевой выработке влияет на искробезопасность контура. Известно, что она повышается, если токи в крайних кабелях тяговой сети протекают в одном направлении. Взаимная индуктивность такой системы проводников определяется зависимостью

$$M = l \cdot \mu_0 \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{\Pi_1}{\Pi_2} \right) \right),$$

где  $l$  – длина параллельного пробега тяговой сети и постороннего контура;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\Pi_1$  – произведение расстояний между центрами инерции поперечных сечений кабелей тяговой сети и постороннего контура, токи в которых противоположно направлены;  $\Pi_2$  – произведение расстояний между центрами инерции поперечных сечений кабелей тяговой сети и постороннего контура, токи в которых одинаково направлены.

Анализируя зависимость для взаимной индуктивности [1] при двухпутевой выработке в установившемся режиме, следует отметить, что ее вывод был основан на следующих принятых допущениях: диаметр брони считался минимальным и равным 0,017 м; расстояние от горизонтальной оси постороннего проводника до поверхности выработки равно 0,1 м; зазор между подвижными составами  $m$  постоянен и равен 0,25 м; расстояние между соседними кабелями тяговой сети  $a$ , постоянно и равно 1,2 м. При этом обратный провод постороннего контура условно считался зеркальным отображением прямого провода за крепью на расстоянии  $b/2$  от нее (рис. 2).

Однако эти допущения справедливы только для частного случая конкретной выработки. При изменении габаритов подвижного состава и профиля выработки последние два параметра не являются постоянными. Зазор между подвижными составами  $m$  также непостоянен и изменяется в широких пределах. Расстояние между соседними кабелями тяговой сети  $a$ , также зависит от зазора между составами. Поэтому для расчета искробезопасного шага транспозиции в двухпутевой выработке, с учетом переходных процессов в тяговой сети, требуется не только применение зависимостей для случая высокой частоты, но и учет возможных изменений в расположении тяговых сетей и посторонних проводников в подземной выработке.

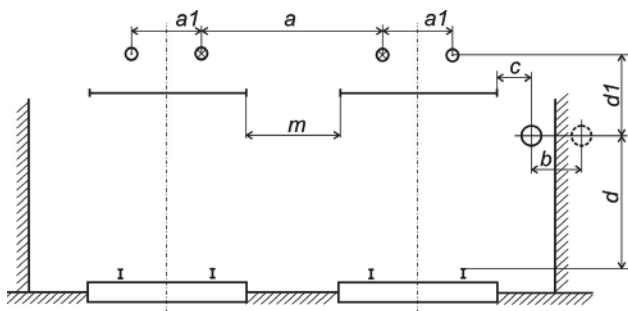


Рис. 2. Расположение тяговой сети и постороннего проводника в сечении двухпутевой выработки

Учитывая, что расстояние между кабелями тяговой сети  $a$  равно 0,4 м [1], для взаимной индуктивности тяговой сети и участка постороннего контура получено выражение

$$M = l\mu_0 \frac{1}{4\pi} \ln \left\{ \frac{((c+0,47)^2 + d_1^2) \cdot ((m+c+2,21)^2 + d_1^2) + d_1^2 \cdot ((0,87+c+b)^2 + d_1^2)}{((1,81+b+c+m)^2 + d_1^2)} \right\} \times \left\{ \frac{1}{[(c+b+0,47)^2 + d_1^2] \cdot [(c+0,87)^2 + d_1^2]} \times \frac{1}{\times((1,81+m+c)^2 + d_1^2) \cdot [(2,21+b+c+m)^2 + d_1^2]} \right\} \quad (2)$$

Выражение может быть использовано при построении алгоритмов расчета искробезопасного шага транспозиции для двухпутевой и однопутевой выработок. Изменения числовых коэффициентов в выражении (2) позволяют применить его при любом взаимном расположении кабелей тяговой сети и посторонних проводников.

Если полагать, что расстояние от горизонтальной оси постороннего проводника до крепи равно 0,1 м, то значение  $b$  при этом равно 0,2 м. При таком значении параметра  $b$  значение напряжения, наводимого на участке постороннего контура тяговой сетью, не превышает 2,8 В, ток короткого замыкания при этом не превышает искробезопасного значения. Изменение значения параметра  $b$  в пределах от 0,2 м до 0,35 м не дает увеличения напряжения на участке постороннего контура выше указанных границ и увеличения тока короткого замыкания до значения, превышающего искробезопасное. Использование выражения (2) при расчете искробезопасного шага транспозиции позволяет варьировать значение параметра  $b$  в соответствии с конструкцией выработки, материалами и толщиной крепи, а также внешним диаметром брони кабеля постороннего проводника и его расположением в выработке. При расчетах целесообразно использовать значение  $b$ , соответствующее наиболее опасному состоянию, т.е. наибольшее из возможных в реальных выработках.

Адекватность полученных результатов доказывает сравнение полученных расчетным путем значений взаимной индуктивности контура „броня кабеля-земля“ и экспериментально определенных ранее значений. Результаты сравнения приведены в таблице.

Таблица

К определению взаимной индуктивности контуров

Длина контура, м	Зазор с, м	Расстояние d <sub>1</sub> , м	Взаимная индуктивность, мкГ		Погрешность ε, %
			расчет	эксперимент	
100	0,8	0,4	4,39	4,35	0,9
80	2,0	0,2	1,81	1,9	4,2
60	0,9	0,3	2,75	2,49	10,4

Из таблицы следует, что относительная погрешность расчетов не выше 10,4 %, что вполне приемлемо для инженерной практики.

**Выводы.**

1. Анализ искробезопасности электрических цепей при работе транспорта с индуктивной передачей энергии показал, что характеристики искробезопасных зон изменяются в зависимости от ряда факторов, в том числе режима работы тяговой сети и расположения проводников в выработке.

2. Выражение, полученное для определения взаимной индуктивности тяговой сети и посторонних проводников, может быть использовано при любом взаимном расположении кабелей тяговой сети и посторонних проводников.

3. Полученные результаты являются основой для построения алгоритмов расчета искробезопасного шага транспозиции при двухпутевой и однопутевой выработках.

**Список литературы / References**

1. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / [Г.Г. Пивняк, И.П. Ремизов, С.А. Саратикянц и др.]; под ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра, 1990. – 245 с.

Pivnyak, G.G., Remizov, I.P. and Saratikyants, A.A (1990), *Transport s induktivnoy peredachej energii dlya ugolnykh shakht* [Transport with the Inductive Transmission of Energy for Coal Mines], Nedra, Moscow, Russia.

2. Пивняк Г.Г. Задачи моделирования режимов работы тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии / Г.Г. Пивняк, Ю.М. Зражевский, Е.И. Хованская – Технічна термодинаміка. Тематичний випуск „Проблеми сучасної електротехніки“. – 2004. – Ч.7. – С. 112–116.

Pivnyak, G.G., Zrazhevskiy, Yu.M., Khovanskaya Ye.I. (2004), “Tasks of design of the modes of operations of hauling network of transport with the inductive transmission of energy”, *Tekhnichna elektrodinamika*, no.7, pp. 27–30.

3. Хованська О.І. Вплив вихідних параметрів тягового перетворювача частоти на втрати потужності в мережі / О.І. Хованська, О.Г. Лисенко // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2005. – Вип. 74. – С. 9–13.

Khovanskaya, O.I., Lysenko, O.G. (2005), “Influence of initial parameters of hauling transformer of frequency on the losses of power in a network”, *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka*, no. 74, pp. 9–13.

**Мета.** Метою даної роботи є оцінка параметрів, що здійснюють вплив на іскробезпеку провідників, розташованих у виробках вугільної шахти.

**Методика.** Методика досліджень заснована на теорії електротехніки при використанні способів високочастотної передачі енергії на електровоз.

**Результати.** Результати роботи показують, що характеристики іскробезпечних зон змінюються в залежності від ряду факторів, у тому числі режиму роботи тягової мережі та розташування провідників у виробці.

Іскробезпека сторонніх провідників у зоні дії тягової мережі може бути досягнута при урахуванні параметрів прокладки рейок і кабелів тягової мережі. Одержані залежності для визначення іскробезпечного кроку транспозиції для двоколіїних і одноколіїних виробок, що відрізняються виразом для визначення взаємної індукції, які можуть бути використані при будь-якому взаємному розташуванні кабелів тягової мережі та сторонніх провідників. Отримані результати є основою для побудови алгоритмів розрахунку іскробезпечного кроку транспозиції при двоколіїних і одноколіїних виробках.

**Наукова новизна.** Значення іскробезпечного кроку транспозиції для гірських виробок транспорту з індуктивною передачею енергії визначаються при урахуванні режимних параметрів тягової мережі; визначені умови, при яких забезпечується іскробезпека.

**Практична значимість.** Одержані залежності визначення іскробезпечного кроку дозволяють розрахувати безпечні для експлуатації зони розташування сторонніх провідників у полі впливу тягової мережі підземного транспорту.

**Ключові слова:** транспорт з індуктивною передачею енергії, тягова мережа, сторонні провідники, іскробезпека

**Purpose.** To estimate the parameters influencing on spark safety of the electric conductors located in the underground workings.

**Methodology.** The method of researches is based on the theory of the electrical engineering at the use of methods of high-frequency transmission of energy on an electric locomotive.

**Findings.** The results show that characteristics of intrinsically safe zones vary depending on several factors, including the power train operation mode and the location of the conductors in the development. Safety of extraneous conductors in the area of action of hauling network can be assured by means of consideration of parameters of cable and rails laying when the hauling network is constructed. We have obtained dependences for determination of safety step of transposition for double track and single track rails, distinguishing by expression for determination of mutual induction. The results have become the basis for the construction of algorithms for the calculation of an intrinsically safe step for transposition for double track and single track rails.

**Originality.** The values of safety step of transposition for rails with the inductive transmission of energy in the mine workings have been determined taking into account the hauling network regimes parameters.

**Practical value.** The results allow defining the areas of safe location of extraneous conductors in the zones influenced by hauling network in the underground mine workings.

**Keywords:** transport with the inductive transmission of energy, hauling network, extraneous explorers safety

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук С.І. Вупанасенком. Дата надходження рукопису 12.07.12.*