

УДК 621.316.9

## КАНАЛЫ И ИХ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ОТ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОСОСТАВОВ

**О. Н. Синчук, В. О. Черная**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: seem@kdu.edu.ua

**Э. С. Гузов, И. О. Синчук, Р. А. Пархоменко**

Криворожский технический университет  
ул. XXII партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина.

**Л. В. Сменова**

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта  
пл. Фейербаха, 7, г. Харьков, 61060, Украина. E-mail: speet@ukr.net

Представлены принципы построения многоуровневой системы мониторинга и диагностики электрического оборудования тяговых электротехнических комплексов. Приведены результаты исследований по выявлению возможностей передачи данных о состоянии основных узлов электровозного транспорта в условиях шахт. Проанализированы возможные каналы передачи данных от шахтного подвижного состава диспетчерам шахты и горного предприятия. Обоснована целесообразность использования контактной сети в качестве канала передачи данных, а также выбран диапазон приемно-передающих частот каналов. Приведена схема подсистемы передачи данных о состоянии электрического оборудования электровоза.

**Ключевые слова:** канал передачи информации, шахтный транспорт, контактная сеть, мониторинг.

## КАНАЛИ ТА ЇХ ПАРАМЕТРИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ВІД СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ШАХТНИХ ЕЛЕКТРОВЗОСОСТАВОВ

**О. М. Сінчук, В. О. Чорна**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: seem@kdu.edu.ua

**Е. С. Гузов, І. О. Сінчук, Р. А. Пархоменко**

Криворізький технічний університет  
вул. XXII партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна.

**Л. В. Сменова**

Українська державна академія залізничного транспорту  
пл. Феєрбаха, 7, м. Харків, 61060, Україна. E-mail: speet@ukr.net

Надано принципи побудови багаторівневої системи моніторингу та діагностики електричного обладнання тягових електротехнічних комплексів. Наведено результати досліджень з виявлення можливостей передачі даних про стан основних вузлів електровозного транспорту в умовах шахт. Проаналізовано можливі канали передачі даних від шахтного рухомого складу диспетчерам шахти та гірничого підприємства. Обґрунтовано доцільність використання контактної мережі як каналу передачі даних, а також обрано діапазон прийнятно-передаючих частот каналів. Наведено схему підсистеми передачі даних про стан електричного обладнання електровоза.

**Ключові слова:** канал передачі інформації, шахтний транспорт, контактна мережа, моніторинг.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Электровозный транспорт – основной вид транспорта горных предприятий с подземными видами работ – является источником повышенного внимания из-за высокой вероятности повреждения их тяговых электромеханических систем (ТЭМС). Последнее чревато отрицательным влиянием на нормально-устойчивое функционирование данных предприятий и, что особенно важно, влечет за собой реальную возможность травм (в т.ч. массовых) у горнорабочих.

За последние 5–10 лет в Украине возрождены научно-прикладные исследования по созданию систем мониторинга состояния тягового электротехнического оборудования электровозосоставов, функционирующих в шахтах и рудниках [1]. Вопросы мониторинга ТЭМС магистральных видов транспорта, в различной степени иерархии их строения, широко освещены в научных изданиях и частично реализованы на практике [2, 3]. К сожалению, подобное отношение не отмечено применительно к условиям подземных видов внутришахтного транспорта (ВШТ). Одной из причин, в силу которых системы мониторинга ТЭМС до

настоящего времени не нашли своего должного применения на горнорудных предприятиях, является неисследованность или априорная, т.е. недостаточно обоснованная, тактика исследований по выбору структуры системы передачи информации с движущегося объекта – электровозосостава – диспетчеру предприятия на поверхность и диспетчеру ВШТ на подземном горизонте шахты (рис. 1).

Целью данного исследования является обоснование структуры, выбор каналов и исследование их параметров для передачи информации от системы мониторинга ТЭМС диспетчеру горного предприятия.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Исследование возможности функционирования систем мониторинга ТЭМС шахтных электровозосоставов позволили определить, что система мониторинга и диагностики тягового подвижного состава должна быть построена по принципу многоуровневой распределительной системы [1]:

- первый уровень – средства контроля данных (датчики, измерительные устройства);
- второй уровень – локальные автоматизирован-

ные системы, контроллеры, автоматизированные системы диагностики у диспетчера шахты;  
– третий уровень – информационный центр сис-

темы мониторинга с подключением в общую систему горного предприятия высшего уровня по стандартным информационным сетям.

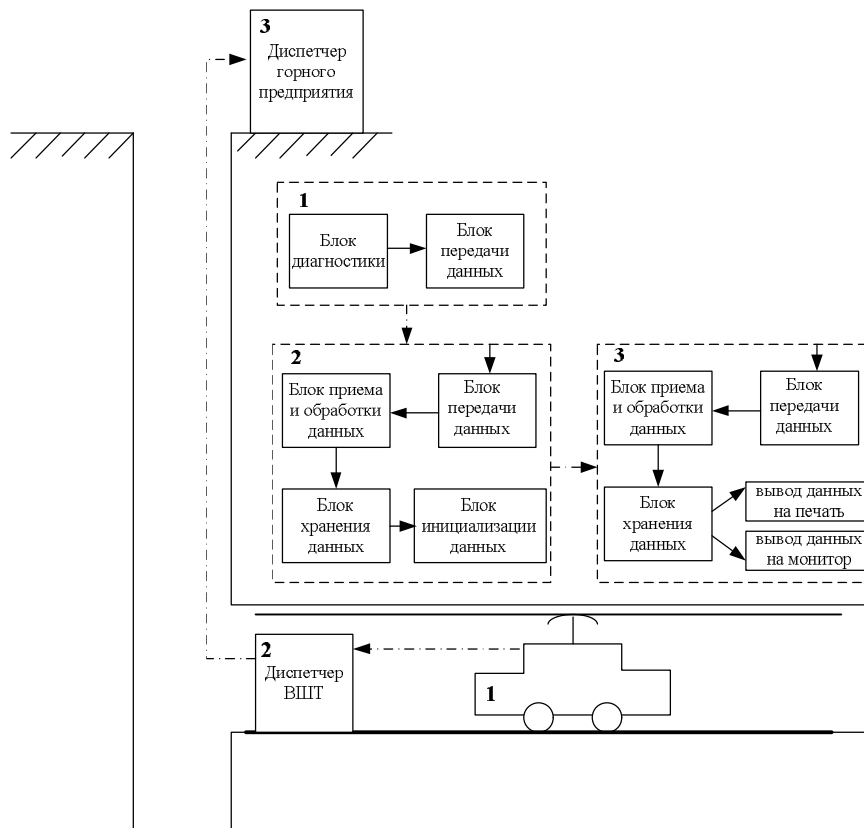


Рисунок 1 – Организация подсистем передачи данных о состоянии электрооборудования электровоза

Функцией первого уровня является предоставление информации для непрерывного мониторинга процессов, контроль которых не предусмотрен локальными системами более высоких уровней. Функцией второго уровня является обеспечение решения сложных задач управления и регулирования работы ВШТ.

Основными функциональными компонентами третьего уровня должны быть:

- база данных реального времени, ориентированная на высокие скорости получения информации, хранение данных, обеспечение доступа к сохраненной информации;
- отображение информации с целью контроля основных параметров ТПС;
- технологические серверы, которые должны являться основным связующим звеном между центральным диспетчерским пунктом предприятия и диспетчером шахты.

Система мониторинга должна носить информационный характер с возможностью постоянной записи и оценки состояния электрооборудования электровозов, находящихся в работе, а также готовности электровозов, находящихся в резерве. При этом первая часть информации должна находиться у диспетчера как ВШТ, так и предприятия.

Диспетчер ВШТ, как правило, располагается в шахте, диспетчер предприятия – на поверхности. Подсистема передачи информации должна носить двухступенчатый уровень:

- первый – электровоз–диспетчер ВШТ;

- второй – диспетчер ВШТ–диспетчер предприятия.

Организация такой подсистемы должна строиться следующим образом:

- передача информации по контактной сети;
- по телефонным проводам.

Из всего многообразия каналов передачи информации в шахте можно выделить следующие: каналы связи по контактной сети, каналы с индуктивной связью по специально проложенным проводникам или рельсовым цепям и радиоканалы.

При откатке контактными электровозами высокочастотный канал связи по контактной сети характеризуется рядом преимуществ перед другими возможными вариантами:

- контактная сеть имеет непосредственную электрическую связь с электровозом, и сигналы управления передаются с незначительным затуханием;
- обеспечивается высокая надёжность канала (при повреждении контактной сети электровоз не сможет работать в любом случае);
- удобство организации канала (не нужна прокладка специальных проводников);
- от контактной сети могут получать питание также устройства управления.

При организации высокочастотного канала связи по контактной сети требуется проведение комплексного анализа ряда вопросов:

- условий распространения высокочастотных

сигналов по контактной сети;

- установление объема высокочастотной обработки контактной сети и подключенных к ней устройств;

- анализа входных сопротивлений различных подключений;

- определения уровня промышленных и взаимных помех;

- оценка условий совместной работы различных высокочастотных каналов.

Условия распространения высокочастотных сигналов по контактной сети обусловлены её электрическими параметрами.

В ходе исследований контактную сеть необходимо рассматривать как сеть с распределенными параметрами, т.к. длина волны соизмерима с длиной линии.

При подключении к началу однородной линии источника синусоидальной электродвижущей силы (ЭДС) по линии распространяется электромагнитная волна, для которой волновое сопротивление определяется выражением

$$\underline{Z}_s = \frac{U}{I},$$

где  $\underline{U}$ ,  $\underline{I}$  – соответственно напряжение и ток волны.

Для устойчивой работы линии сопротивления нагрузки в конце линии  $\underline{Z}_n$  должно равняться  $\underline{Z}_s$ .

При этом бегущая волна полностью поглощается сопротивлением нагрузки, а входное сопротивление линии  $\underline{Z}_w = \underline{Z}_s$ .

При наличии в линии только бегущей волны соотношение между напряжением  $\underline{U}_n$  или током  $\underline{I}_n$  в наличии линии и напряжением  $\underline{U}_x$  или током  $\underline{I}_x$  в любой точке на расстоянии  $X$  от начала следующей:

$$\frac{\underline{I}_n}{\underline{I}_x} = \frac{\underline{U}_n}{\underline{U}_x} = e^{\gamma x},$$

где  $\gamma$  – коэффициент распространения;  $\gamma = \alpha + j\beta$ ;  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $\beta$  – коэффициент фазы.

Коэффициент распространения также определяется по измеренным входным сопротивлениям линии, учитывая, что

$$\text{th} \underline{\gamma} l = \sqrt{\frac{\underline{z}_0}{\underline{z}_\infty}},$$

откуда

$$\underline{\gamma} = \frac{1}{2l} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{\underline{z}_0}{\underline{z}_\infty}}}{1 - \sqrt{\frac{\underline{z}_0}{\underline{z}_\infty}}}.$$

Действительная часть комплексной величины  $\underline{\gamma}$  – коэффициент затухания:

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{\underline{z}_0}{\underline{z}_\infty}}}{1 - \sqrt{\frac{\underline{z}_0}{\underline{z}_\infty}}},$$

а мнимая часть – коэффициент фазы:

$$\beta = \frac{\varphi}{2l},$$

где  $\varphi$  – фазовый угол у комплексного выражения под знаком в предыдущей формуле.

Если известна скорость распространения электромагнитной волны, коэффициент фазы может быть определен более простым способом:

$$\beta = \frac{2\pi}{V}.$$

С целью определения величины входного сопротивления в зависимости от частоты были произведены измерения на шахтных электровозах К10 и К14, находящихся в эксплуатации. Входное сопротивление определялось для трех состояний: при включенных тяговых двигателях, при последовательном и при параллельном соединении двигателей.

Результаты исследований представлены на рис. 2. Входные сопротивления электровозов с включенными двигателями значительно выше сопротивлений электровозов с включенными двигателями.

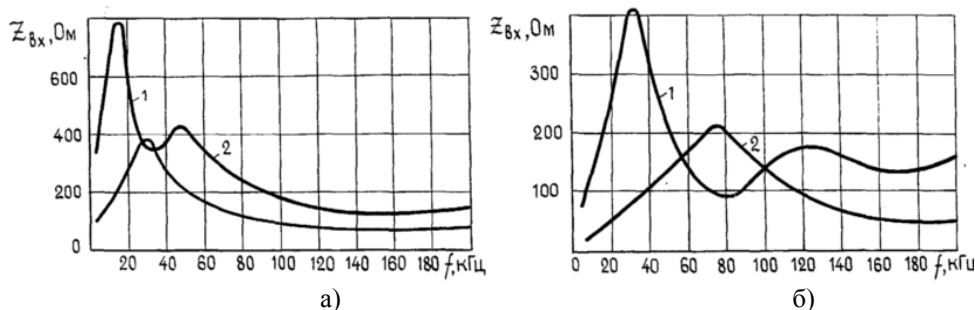


Рисунок 2 – Кривые изменений входных сопротивлений: а) электровоза типа К10; б) электровоза типа К14 (1 – зависимость  $z_w(f)$  при последовательном соединении двигателей, 2 – при параллельном)

Входное сопротивление электровоза практически не зависит от позиции контроллера и определяется лишь схемой соединения двигателей (последова-

тельное или параллельное соединение).

Как видно из рассмотрения кривых входного сопротивления различных электровозов, их форма

аналогічна:

а) входное сопротивление имеет наибольшую величину при последовательном соединении двигателей;

б) максимум сопротивления при последовательном соединении двигателей имеет место на частоте, вдвое меньшей, чем максимум при параллельном соединении;

с) максимум входного сопротивления при параллельном соединении двигателей совпадает по частоте с минимумом сопротивления при последовательном соединении.

Это можно объяснить, рассматривая обмотки двигателей как цепь с распределенным параметром (линию). В данном случае – короткозамкнутая линия, первый резонанс (максимум) будет иметь место при длине линии, равной четверти длины волны. Последовательное соединение двигателей соответствует линии вдвое длиннее по сравнению с параллельным соединением, и резонанс наступает на вдвое меньшей частоте.

Входное сопротивление и резонансная частота в большой степени зависят от мощности двигателей: с увеличением мощности растет резонансная частота и падает величина максимума входного сопротивления.

Частотные системы, работающие по контактной сети, должны быть пригодны для всех типов электровозов. Анализ значений входного сопротивления для разных электровозов и схем соединения

двигателей показывает, что сопротивление имеет относительно небольшую величину во всем исследуемом диапазоне частот. Наибольшее значение сопротивления имеет место при последовательном соединении тяговых двигателей, которое и используется при дистанционном управлении электровозами. На частотах выше 10 кГц входное сопротивление имеет величину порядка 100 Ом и более, применение высокочастотных заградителей при этом не требуется.

Для учета влияния на входное сопротивление величины нагрузки двигателей и положения реверсора были проведены дополнительные измерения.

При изменении величины нагрузки изменяется степень насыщения стали двигателя, что может оказывать влияние на величину входного сопротивления. Проведенные эксперименты при изменении нагрузки от нуля до двукратного номинального значения позволили сделать следующие выводы:

– величина нагрузки не оказывает существенного влияния на входное сопротивление тока высокой частоты;

– влияние нагрузки уменьшается с ростом частоты;

– максимальное значение входного сопротивления на резонансной частоте возрастает с увеличением нагрузки, поэтому при анализе входных сопротивлений нужно ориентироваться на минимальные величины, измеренные без нагрузки (рис. 3, 4).

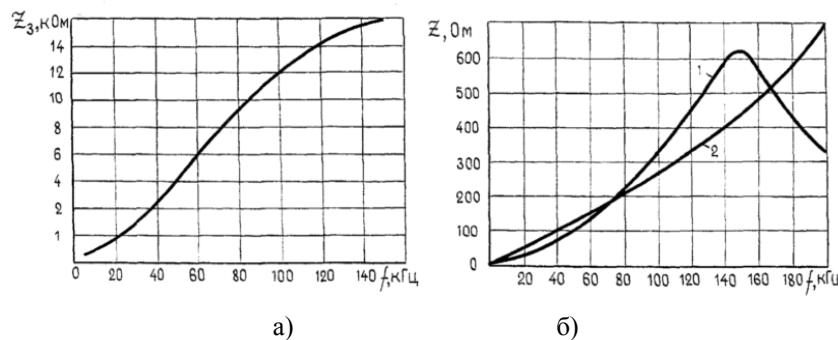


Рисунок 3 – Изменение сопротивления заградителя с индуктивностью катушки 0,4 мГн: а) в функции частоты тока; б) кривые изменений входных сопротивлений передающего шлейфа

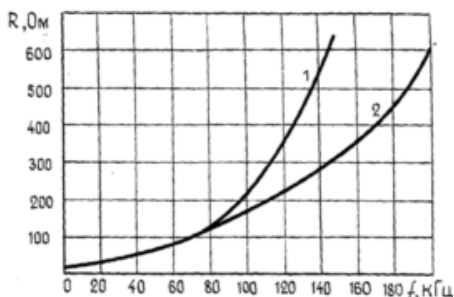


Рисунок 4 – Кривые изменений активных составляющих входных сопротивлений передающих шлейфов

При реверсировании двигателей изменяется полярность включения обмотки возбуждения. Обмотку возбуждения можно считать симметричной, по

этому изменение частотной характеристики может быть вызвано только взаимной индукцией между обмотками якоря и возбуждения.

Измерения показали, что при реверсировании входные сопротивления отличаются незначительно, а на частотах более 50 кГц совпадают. Это говорит о том, что на высоких частотах, вследствие больших потерь в стали, величина взаимной индукции между обмотками незначительна и убывает с ростом частоты. В данном случае это явление положительно и входное сопротивление двигателей при реверсировании можно считать неизменным.

При использовании каналов индуктивной связи для дистанционного управления электровозом вдоль участка управления прокладывается излучающая петля из проводов (передающий шлейф). К петле подключается передатчик, посылающий в неё высо-

кочастотные сигналы, соответствующие командам управления. Магнитное поле воспринимается приемной антенной, установленной в электровозе.

Излучающая петля может прокладываться в любом месте выработки, чаще всего по подошве. В качестве петли, наряду со специально прокладываемыми проводами, могут использоваться рельсы откаточных путей – так называемые рельсовые цепи.

Организация канала связи по рельсам в условиях железорудных шахт, тем более в местах погрузки, встречает серьезные трудности. Это связано с тем, что рельсовые пути в местах погрузки, как правило, засыпаны рудой и обводнены, стыки между рельсами зачастую не имеют электрического контакта. В этих условиях сопротивление балласта оказывается низким, а сопротивление рельсов высоким, в результате такой канал связи не может быть надежным.

Канал связи по рельсовой цепи имеет также принципиальные недостатки, заключающиеся в том, что передатчик должен размещаться на конце рельсовой цепи, а электровоз в составе должен размещаться только со стороны передатчика.

Индуктивный канал связи с использованием специально прокладываемых проводных шлейфов является более совершенным, обеспечивая надежную работу при гораздо меньших затратах.

Расстояние между проводами шлейфа при прокладке по шпалам рельсового пути составляет 0,4 м, при прокладке по стенкам или кровле выработки может достигать 1 м. Поэтому параметры шлейфа и условия передачи анализировались при изменении расстояния между проводами шлейфа в пределах 0,4–1 м. Сопротивление передающего шлейфа может быть представлено состоящим из активной и индуктивной составляющих.

Активное сопротивление проводов передающего шлейфа при переменном токе значительно больше, чем при постоянном вследствие поверхностного эффекта, эффекта близости, потерь в проводящих элементах вблизи проводов шлейфа. Активное сопротивление проводов с учетом поверхностного эффекта определяется по формуле

$$R = K_1 R_0,$$

где  $R_0$  – сопротивление двухпроводной цепи при постоянном токе, Ом;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления вследствие поверхностного эффекта.

Коэффициент  $K_1$  определяется по таблицам в зависимости от вспомогательной величины  $X$ , которая для воздушных цепей из медных проводов может быть вычислена по формуле

$$X = 0,0105d\sqrt{f},$$

где  $d$  – диаметр провода, мм;  $f$  – частота тока, Гц.

Основываясь на соображениях уменьшения стоимости и достаточной проводимости, а также механической прочности, целесообразно использовать для передающих шлейфов провод марки ПВ сечением 2,5 мм<sup>2</sup> (диаметр 1,8 мм). Тогда при изменении частоты от 10 до 100 кГц вспомогательная величина  $X$  будет изменяться в пределах 1,9...6, а коэффициент – в пределах 1,07...2,39. Сопротивление двухпроводной цепи длиной 1 км на постоянном токе составляет 14

Ом/км, а сопротивление с учетом поверхностного эффекта при изменении частоты от 10 до 100 кГц будет изменяться в пределах от 15 до 33 Ом/км.

Если расстояние между проводами в четыре раза и более превышает диаметр проводов, то влиянием эффекта близости на активное сопротивление можно пренебречь. В данном случае расстояние между проводами превышает диаметр более, чем в 100 раз. Активное сопротивление при переменном токе увеличивается также вследствие потерь в проводящих элементах, находящихся вблизи проводов шлейфа. К ним относятся элементы крепления, трубы, рельсы, горные породы. Расчет магнитных полей и величины потерь во всех этих элементах представляет большую сложность. Поэтому для получения достоверных результатов добавочное сопротивление вследствие потерь на другой частоте может быть определено по формуле

$$R_g = R'_g \sqrt{\frac{f}{f'}}.$$

Индуктивность двухпроводной цепи, как и магнитный поток, является суммой двух величин – внешней и внутренней индуктивности. Внешняя индуктивность обусловлена магнитным потоком, находящимся в пространстве между проводами, а внутренняя – магнитным потоком, пересекающим провода цепи.

Для цепей воздушных линий индуктивность определяется следующим соотношением:

$$L = 0,4 \ln \frac{a}{r} + 0,1 K_2 \mu_r,$$

где  $a$  – расстояние между проводами, мм;  $r$  – радиус проводов, мм;  $\mu_r$  – магнитная проницаемость материала проводов,  $K_2$  – коэффициент, характеризующий влияние поверхностного эффекта на внутреннюю составляющую индуктивности цепи.

В целом индуктивность передающего шлейфа при изменении расстояния между проводами и частотой тока может изменяться в пределах 2,5...2,9 мГн/км, т.е. индуктивность изменяется в относительно небольших пределах, главным образом, вследствие изменения расстояния между проводами. Изменение индуктивности при изменении частоты не превышает 2 % и в рассматриваемых условиях может не учитываться.

При прокладке передающего шлейфа по шпалам между рельсами откаточного пути расстояние между проводами шлейфа составляло 0,4 м, расстояние между внутренней стороной рельса и проводом – 0,15 м; провода шлейфа были частично засыпаны рудой, частично находились в воде, на участке размещения шлейфа находился состав из 10 вагонеток ВРГ-4 и электровоза К14.

По результатам измерений получена зависимость входного сопротивления шлейфа от частоты (кривая 1, рис. 4). Из графика виден волновой характер входного сопротивления с резонансом на частоте 150 кГц.

Аналогичные исследования проводились при прокладке передающего шлейфа по стенке и кровле выработки. Расстояние между проводами шлейфа, в соответствии с размерами горных выработок, при-

нималось равным 1 м. В обоих случаях параметры очень близкие.

**ВЫВОДЫ.** 1. В результате исследований предложена структура подсистемы передачи информации о состоянии электрооборудования электровоза в диспетчерский пункт на горизонте и на поверхности шахты.

2. Проанализированы существующие способы передачи информации, в результате чего было отдано предпочтение каналу передачи данных по контактной сети.

3. По результатам исследований сделан вывод о взаимном влиянии величины нагрузки и параметров контактной сети.

**CHANNELS AND THEIR PARAMETERS FOR TRANSMISSION INFORMATION FROM SYSTEM OF MONITORING THE TRACTIVE ELECTRIC SYSTEMS MINE OF THE TRAIN ELEKTRIC LOCOMOTIVE**

**O. Sinchuk, V. Chernaya**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: seem@kdu.edu.ua

**E. Guzov, I. Sinchuk, R. Parhomenko**

Kryvyi Rih Technical University  
ul. XXII Partsyezda, 11, Kryvoy Rog, 50027, Ukraine.

**L. Smenova**

Ukrainian State Academy of Railway Transport  
pl. Feerbakha, 7, Kharkov, 61060, Ukraine. E-mail: speet@ukr.net

Principles of building of layered system of monitoring and diagnostics of electric equipment tractive complex are presented. The brought results of studies on revealing the possibilities data communication about condition of main nodes electric locomotive transport in condition of mines. The possible channels data communication will analysed from mine rolling stock traffic manager mines and mountain enterprise. Motivated practicability of use to contact network as channel data communication, as well as is chose range acceptance-sending frequencies channel. Broughted subsystem scheme data communication about condition of electric equipping the electric locomotive.

**Key words:** the channel of issue to information, mine transport, contact network, monitoring.

REFERENCES

1. Backbone networks Petri and modeling nearly emergency and emergencies in tractive electric drive industrial electric locomotive / O.N. Sinchuk, I.O. Sinchuk, V.O. Chernaya // *Proceedings of Higher Education. Electrical engineering.* – 2011. – № 2. – PP. 42–47. [in Russian]

2. *Designing managerial system by electric rolling stocks* / Ed. by N. Rotanov. – М.: Transport, 1986. – 228 p. [in Russian]

ЛИТЕРАТУРА  
1. Синчук О.Н., Синчук И.О., Черная В.О. Базовые сети Петри и моделирование псевдоаварийных и аварийных ситуаций в тяговых электроприводах промышленных электровозов // *Изв. ВУЗов. Электромеханика.* – 2011. – № 2. – С. 42–47.

2. Проектирование систем управления электроподвижным составом / Под ред. Ротанова Н.А. – М.: Транспорт, 1986. – 228 с.

3. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1990. – 471 с.

3. Tikhmenev B.N., Trahtman L.N. *Rolling stock of the electrified railways.* – М.: Transport, 1990. – 471 p. [in Russian]

Стаття надійшла 15.07.2012.  
Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Чорним О.П.