

УДК 621.391

**В.В. Турупалов (канд. техн. наук, проф.), И.А. Молоковский, Р.Ш. Абрамов**  
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк  
кафедра автоматики и телекоммуникаций  
E-mail: [igor.molokovskiy@gmail.com](mailto:igor.molokovskiy@gmail.com), [rusik91@gmail.com](mailto:rusik91@gmail.com)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*В статье рассмотрены вопросы распространения радиосигналов разной частоты в сложных условиях подземной части сети специального назначения угледобывающих предприятий. Построена и проанализирована модель с помощью программного пакета LabView, позволяющая произвести моделирование прохождения радиосигнала в подземной части угледобывающего предприятия.*

**Ключевые слова:** Модель – LabView – Сигнал.

### **Актуальность проблемы**

Угледобывающая промышленность, как правило, характеризуется большим количеством капитальных инвестиций, стоимостью обслуживания. Для поддержания конкурентоспособности на мировом рынке необходимо прилагать усилия по снижению себестоимости продукции, что пробудило угледобывающую промышленность к автоматизации и оптимальному использованию оборудования за счет увеличения его доступности и производительности [1]. Таким образом, постоянный мониторинг размещения оборудования, его технического состояния, и определения местоположения персонала позволит сделать угледобывающие предприятия жизнеспособными, конкурентоспособными и прибыльными [5,6]. В случае аварийной ситуации, очень сложно определить какой персонал оказался «в ловушке», его количество и точное местоположение. Идентификация и кодирования персонала является жизненно важной для центра технического обслуживания телекоммуникационной сети специального назначения в аварийных ситуациях и нормальных условиях эксплуатации.

### **Постановка задачи**

В настоящее время в большинстве случаев передача информации между устройствами различных уровней осуществляется с помощью витой «пары» RS-485. Однако, если источники информации расположены на подвижных объектах (например, персонал, комбайн), то достаточно сложно использовать проводные линии связи, т.к. необходимо постоянное изменение длины кабеля, что негативно влияет на надежность передачи информации (возможны обрывы, прочие повреждения). Поэтому для повышения надежности передачи информации считаем целесообразным использовать радиоканал. Для этого должны быть проанализированы современные беспроводные технологии передачи информации в разрезе возможной эксплуатации в сложных условиях подземной части угледобывающего предприятия.

### **Основная часть**

Работа систем радиосвязи в шахтах, туннелях и других подземных сооружениях отличается рядом особенностей:

– сильные затухания радиоволн в горных породах, зависящих от типа породы, их влажности, частоты, электромагнитного поля;

© Турупалов В.В., Молоковский И.А., Абрамов Р.Ш. 2013

– повышенными требованиями к аппаратуре вследствие высокой влажности, запыленности, повышенной взрывоопасности;

– большим разнообразием параметров подземных сооружений (длина, форма и размеры поперечных сечений, материалы стен, число металлических проводников и т.п.).

В данной статье проанализирован математический аппарат распространения радиоволн и на основе математического описания распространения радиоволн в подземной части угледобывающего предприятия, построена модель в пакете LabView. Данная модель позволяет оценить максимально допустимое отдаление принимающей антенны при разных частотах передаваемого сигнала и разных мощностях передатчика.

Осуществили рассмотрение модели распространения радиоволн в выработки на математических компьютерных моделях.

Рассмотрим математический механизм передачи радиоволн в шахте. Передатчик работает на частоту  $f$  и имеет мощность  $P_{пер}$ . Излученная мощность  $P_{изл}$  меньше мощности передатчика из-за наличия тепловых потерь в фидерной линии и неидеального согласования передающей антенны [8]:

$$P_{изл} = P_{пер} \cdot \eta_{пер}, \quad (1)$$

где  $\eta_{пер}$  – коэффициент полезного действия тракта передатчика.

Тепловые потери в фидерной линии принято характеризовать погонным затуханием  $\alpha$ , выражаемым обычно в дБ/м. Это затухание в линии длиной 1м. При длине фидера  $l$  затухание в нем составит [8]:

$$A_{дБ} = \alpha * l \text{ в дБ}, \quad (2)$$

или

$$A = 10^{\frac{\alpha l}{10}} \quad (3)$$

в относительных единицах.

Для неидеально согласованной антенны распределение напряжения вдоль фидерной линии образуется наложением двух волн: падающей, имеющей амплитуду  $U_{пад}$ , и отраженной с амплитудой  $U_{отр}$  (рисунок 1).

Напряжение вдоль линии изменяется, достигая минимального  $U_{min}$  и максимального  $U_{max}$  значений в точках, смещенных на четверть длины волны в линии. Степень согласования антенны с фидерной линией принято характеризовать двумя параметрами: коэффициентом отражения

$$\Gamma = \frac{U_{отр}}{U_{пад}}, \quad (4)$$

или коэффициент стоячей волны (КСВ)

$$КСВ = \frac{U_{max}}{U_{min}}. \quad (5)$$

Один из этих параметров легко выражается через другой:

$$\Gamma = \frac{КСВ - 1}{КСВ + 1}. \quad (6)$$

А так же можно получить аналитическое выражение для постоянной распространения  $\Gamma$  радиоволн вдоль туннеля:

$$\Gamma = \gamma_0 \left[ 1 + \frac{1}{\gamma_c l} \ln \frac{2l}{c} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где  $\gamma_0 = i\epsilon_0\mu_0\omega$  – постоянная распространения радиоволн в свободном пространстве;

$\gamma_c = \sqrt{i\mu_0\omega(\sigma_c + i\varepsilon_{r3}\omega\varepsilon_0)}$  – постоянная распространения радиоволн в материале стенки туннели,  
 где  $\mu_0$  –  $4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м;  $\omega$  – круговая частота;  $\varepsilon_0$  –  $(1/36\pi) \times 10^{-9}$  Ф/м;  $\sigma_c$ ,  $\varepsilon_{r3}$ ,  $\varepsilon_0$  – электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость материала стенки туннеля.

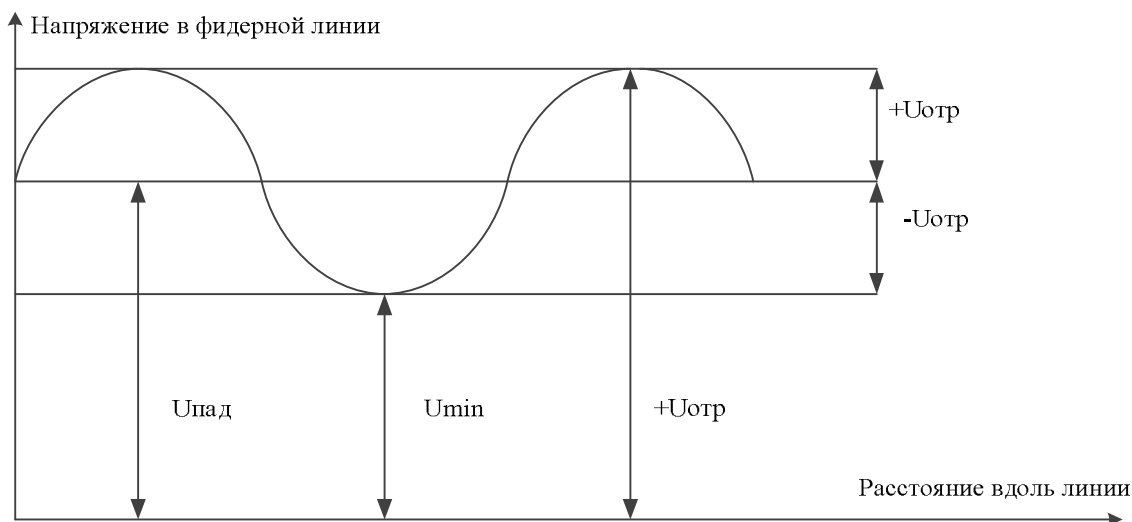


Рисунок 1 – Распределение напряжение вдоль фидерной линии

Распространения симметричного и несимметричного типов волн в цилиндрическом туннеле радиусом  $a=2$ м; относительная диэлектрическая проницаемость материала стенки туннели  $\varepsilon_{r3} = 10$ , электрическая проводимость материала  $\sigma_c = 10^{-2}$  См/м.

Для идеальной согласованной антенны  $KCB=1$ ,  $\Gamma=0$ . Реально у хорошо согласованной антенны  $KCB \leq 1,2 \div 1,5$ .

При учете обоих факторов коэффициент полезного действия тракта передатчика составит:

$$\eta_{пер} = A \cdot (1 - \Gamma^2) = A \left[ 1 - \left( \gamma_0 \left[ 1 + \frac{1}{\gamma_c l} \ln \frac{2l}{c} \right]^{1/2} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Если бы передающая антенна излучала равномерно во всех направлениях, то на расстоянии  $R$  от источника модуль вектора Пойнтинга, численно равный плотности потока мощности, был бы равен:

$$\Pi_0 = \frac{P_{изл}}{4\pi R^2}. \quad (9)$$

Любая реальная антенна обладает направленностью излучения, и всегда имеется направление, в котором излучается максимум энергии. Коэффициентом направленного действия (КНД) антенны называется отношение плотности потока мощности, создаваемой в направлении максимума излучения направленной антенной, к плотности потока мощности изотропной антенны при одинаковой излученной мощности.

Тогда в направлении максимума излучения антенны, имеющей КНД  $D_{пер}$ , плотность потока мощности на расстоянии  $R$ :

$$\Pi = \frac{P_{пер} \cdot \eta_{пер} \cdot D_{пер}}{4\pi R^2}. \quad (10)$$

С другой стороны, плотность потока мощности выражается через действующие значения напряженностей электрического  $E_\delta$  и магнитного  $H_\delta$  полей, которые, в свою очередь, связаны между собой характеристическим сопротивлением свободного пространства  $Z_0=120\pi$  Ом:

$$\Pi = \frac{P_{nep} \cdot \eta_{nep} \cdot D_{nep}}{4\pi R^2}. \quad (11)$$

Это позволяет определить действующее значение напряженности электрического поля на расстоянии  $R$ :

$$E_\delta = \frac{\sqrt{30P_{nep}\eta_{nep}D_{nep}}}{R}, \quad (12)$$

и ее амплитудное значение:

$$E_m = \frac{\sqrt{60P_{nep}\eta_{nep}D_{nep}}}{R}. \quad (13)$$

Антенны, работающие на прием, принято характеризовать действующей длиной  $hd$  или эффективной площадью  $S_{эфф}$ . Первый параметр применяется для описания антенн метрового и более длинноволновых диапазонов. Такие антенны представляют систему тонких металлических проводников, а напряжение на их выходных клеммах:

$$U_{вых} = E_\delta \cdot h_\delta. \quad (14)$$

Для более высокочастотных диапазонов обычно определяется мощность на выходе приемной антенны:

$$P_{npA} = \Pi \cdot S_{эфф}. \quad (15)$$

Эффективная площадь антенны связана с ее КНД  $D_{npA}$  соотношением:

$$S_{эфф} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot D_{npA}, \quad (16)$$

где  $\lambda = c/f$  - длина волны.

Потери согласования приемной антенны определяются ее КСВ, потери в фидере приемного тракта определяются также, как и в передающем. Вместе они учитываются введением коэффициента полезного действия приемного фидерного тракта  $\eta_{прм}$ . Тогда мощность на входе приемника:

$$P_{прм} = \frac{P_{nep} \cdot D_{nep} \cdot D_{npA} \cdot \eta_{nep} \cdot \eta_{прм} \cdot \lambda^2}{(4\pi R)^2}. \quad (17)$$

Приемник характеризуется чувствительностью  $P_{прм}^{\min}$ , такой минимальной мощностью на входе, при которой осуществляется прием сигналов с заданным качеством. Обычно эта величина задается в дБ относительно 1 мВт (дБ/мВт), для перехода к системе СП используется соотношение:

$$P_{прм}^{\min} = 10^{\left(\frac{P(\text{дБ/мВт})}{10} - 3\right)}. \quad (18)$$

Максимальную дальность связи  $R_{\max}$  получают, если в выражение (5) подставить чувствительность приемника и разрешить его относительно  $R$ :

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{nep} \cdot D_{nep} \cdot D_{npA} \cdot \eta_{nep} \cdot \eta_{прм}}{P_{прм}^{\min}}}. \quad (19)$$

Приведенные выше соотношения позволяют осуществить моделирование радиотрассы в свободном пространстве и разработать соответствующую виртуальную лабораторную установку.

На рисунке 2 представлена лицевая панель модели, где задаются значения для проведения моделирования. На лицевой панели присутствуют регуляторы: частоты передаваемого сигнала, мощности передатчика, КНД и КСВ для антенны передатчика, КНД и КСВ для антенны приемника, чувствительность приемника, погонное затухание и длина кабеля для фидера передатчика, погонное затухание и длина кабеля для фидера приемника.

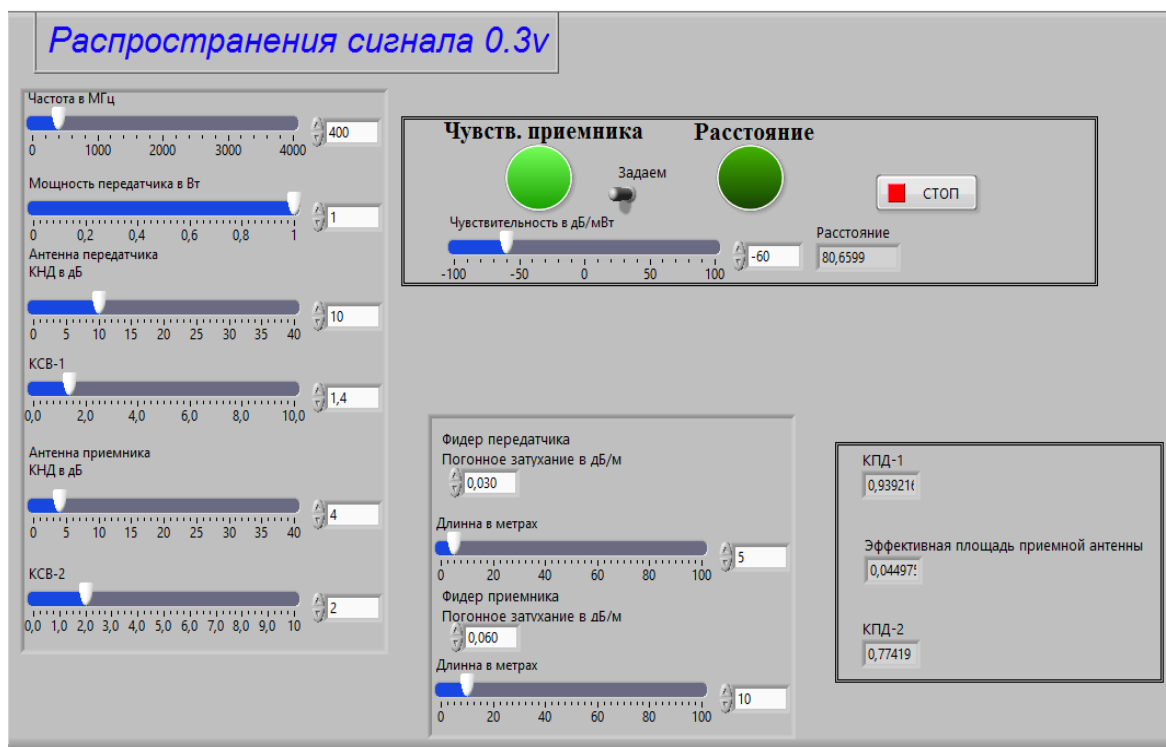


Рисунок 2 – Лицевая панель модели LabView распространения радиоволн

Так же на лицевой панели отображаются результаты моделирования такие как: максимальное расстояние для заданных параметров, эффективная площадь приемной антенны и коэффициенты направленного действия.

На рисунке 3 представлен блок диаграмм, где происходит расчет всего математического механизма модели, на этом блоке представлен ряд подпрограмм (SubView), таких как: Вт в дБмВт, Г в КПД, дБмВт в Вт, Затухание в фидере, КНД в Сэф, КНД из дБ, КСВ в КПД, Частота в длину волны.

Таблица 1

Результаты моделирования

		Мощность передатчика, мВт			
		50	100	500	1000
Частота, МГц	200	36,0722	51,0138	114,07	161,32
	400	18,0361	25,5069	57,0352	80,6599
	1000	7,21444	10,2028	22,8141	32,264
	2400	3,00602	4,25115	9,50587	13,4433
	3000	2,40481	3,40092	7,60469	10,7547

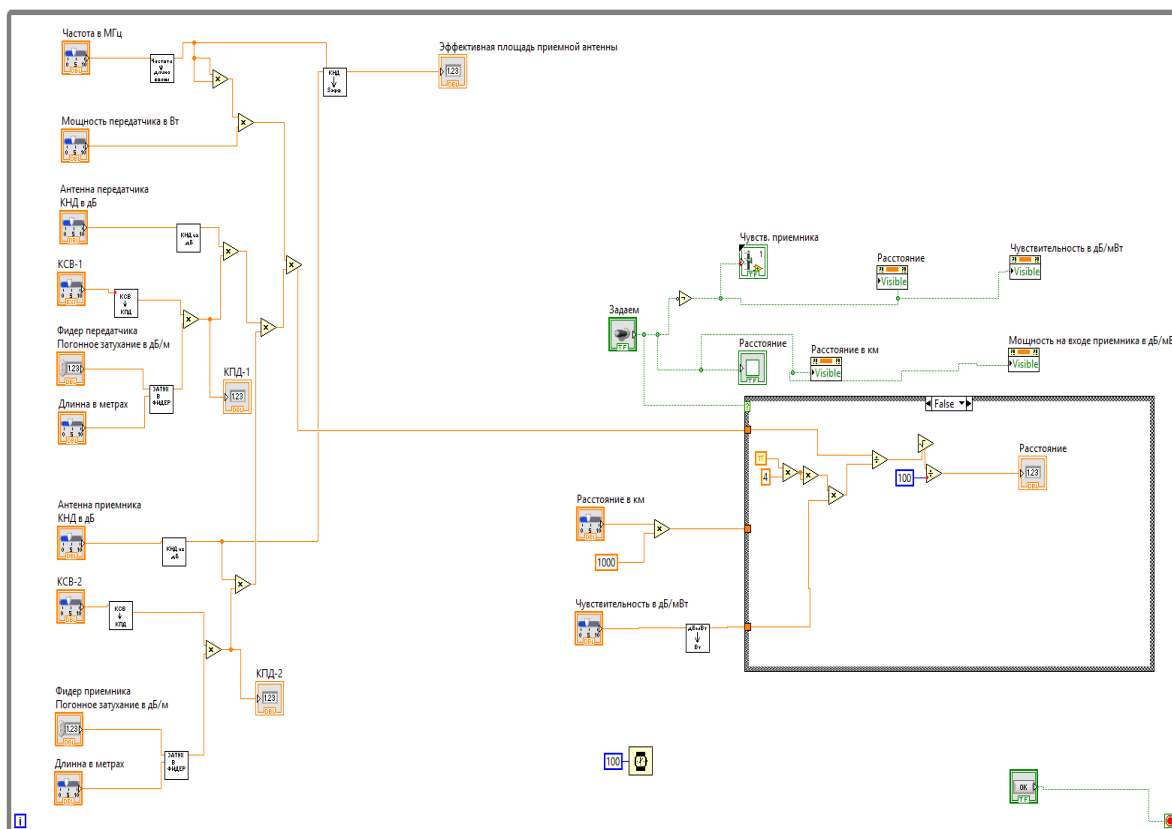


Рисунок 3 – Блок диаграммы модели LabView распространения радиоволн в пространстве

Так же на блоке диаграмм реализованы такие вспомогательные функции как: цикл запуска программы, выход из цикла при помощи кнопки STOP, переключение между разными частями программы, временной счетчик.

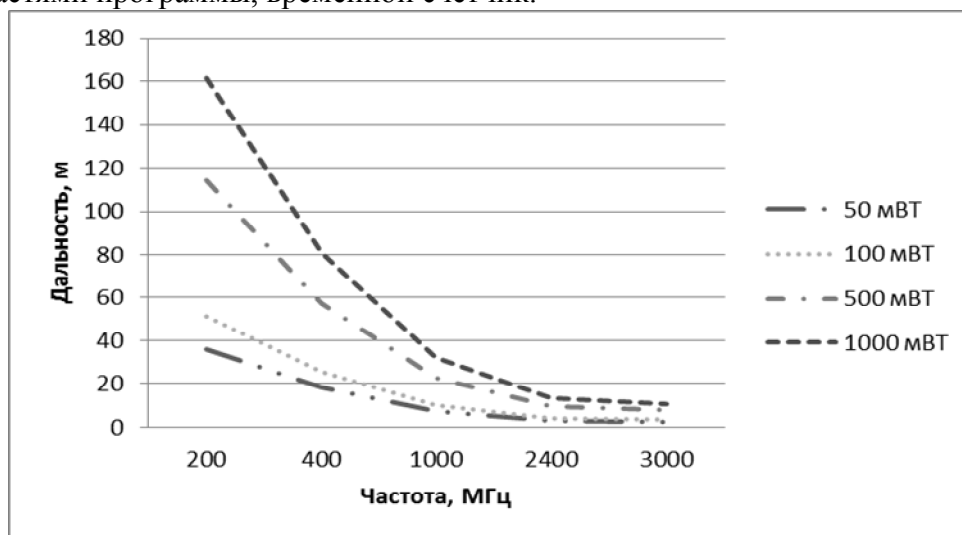


Рисунок 4 – Графическое представление результатов моделирования

В результате моделирования были получены следующие результаты которые представлены в таблице 1 и изображены графически на рисунке 4.

**Вывод**

Беспроводные локальные сети все больше пользуются популярностью. В течение нескольких лет они проходили процесс стандартизации, повышалась скорость передачи

данных. Сегодня беспроводные сети позволяют предоставлять подключение там, где невозможно кабельное соединение или необходима полная мобильность. При этом беспроводные сети совместимы с кабельными сетями. Последние разработки в области беспроводной связи привели к появлению на рынке устройств новой спецификации стандарта - IEEE 802.11g. Новое оборудование позволяет передавать данные на скоростях до 54 Мбит/с и работает в диапазоне частот 2.4 ГГц.

В статье рассмотрены вопросы распространения радиосигналов разной частоты (в том числе и 2,4 ГГц) в сложных условиях подземной части сети специального назначения угледобывающих предприятий. Работа систем радиосвязи в шахтах, туннелях и других подземных сооружениях отличается рядом особенностей: сильные затухания радиоволн в горных породах, зависящим от типов пород, их влажности частоты электромагнитного поля; повышенными требованиями к аппаратуре вследствие высокой влажности, запыленности, повышенной взрывоопасности; большим разнообразием параметров подземных сооружений.

Построена и проанализирована модель распространения радиоволн в сложных условиях подземной части сети специального назначения угледобывающих предприятий, с помощью программного пакета LabView, позволяющая оценить характеристики прохождения радиосигнала в подземной части угледобывающего предприятия. Предложенная модель позволяет учесть влияние электрической проводимости и диэлектрической проницаемости материала стенки туннеля, различную частоту и мощность излучения радиосигнала.

На основе проведенных исследований предложенной модели, можно сделать вывод, что:

- при использовании высоких частот понижается предельное расстояние между передающей и приемной антеннами;
- уменьшение мощности передатчика приводит к сокращению дальности передачи радиосигнала.

#### Список использованной литературы

1. Молоковський І.О. Аналіз систем промислового зв'язку / І.О. Молоковський; Національна Академія наук України. Інститут проблем моделювання в енергетиці // Збірник наукових праць "Моделювання та інформаційні технології". – 2009. – Випуск 52. – С. 157-160.
2. Молоковский И.А. Влияние окружающей среды на передачу радиосигналов в промышленных телекоммуникационных системах / И.А. Молоковский // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології». - Лівадія: ДУІКТ, 2012 р. – С. 147-149.
3. Турупалов В.В. Информационная система обеспечения безопасности промышленных предприятий / В.В. Турупалов // Науковий вісник Чернівецького університету «Комп'ютерні системи та компоненти»: збірник наукових праць. – 2012. – Т. 3, Випуск 2. – С. 65-68.
4. Турупалов В.В. Роль телекомунікаційних технологій у системах автоматизації підприємств гірничого-добувного комплексу / В.В. Турупалов // Научно-теоретический журнал «Искусственный интеллект». - 2012. - №4. - С. 516 - 521.
5. Турупалов В.В. Повышение надежности технологических сетей связи / В.В. Турупалов, И.А. Молоковский // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології: VII Міжнародна науково-технічна конференція: збірник тез. - К., 2011. - С. 152–154.
6. Турупалов В.В. Специалізована телекомунікаційна мережа в системі управління вугільною шахтою / В.В. Турупалов, Р.В. Федюк, В.О. Попов // Автоматика-2004: 11-я международная конференция по автоматическому управлению, (27–30 сентября 2004 г.): тези докл. – К., 2004. - Т. 4. - С. 113.

7. Молоковський І.А. Исследование возможности передачи информации с по-мощью беспроводных технологий в теле-коммуникационных сетях промыш-ленных предприятий / Молоковський І.А. // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета, серия: «Вычислительная техника и автоматизация-2010». - 2010. – Выпуск 19 (171). – С. 77-82.
8. Савкин М. М. Распространение радиоволн в горных выработках / М. М. Савкин // Радиосвязь и высокочастотная телемеханика в горной промышленности: сб. науч. тр. СО АН СССР. – Новосибирск, 1964. – С. 7–38.

Надійшла до редакції  
31.03.2013

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. Скобцов Ю.О.

**В.В. Турупалов, І.О. Молоковський, Р.Ш. Абрамов**

**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»**

**Дослідження процесу поширення радіохвиль в телекомунікаційних мережах спеціального призначення.** У статті розглянуті питання поширення радіосигналів різної частоти в складних умовах підземної частини мережі спеціального призначення вугледобувних підприємств. Побудована і проаналізована модель за допомогою програмного пакету LabView, що дозволяє зробити моделювання проходження радіосигналу в підземній частині вугледобувного підприємства.

**Ключові слова:** Модель - LabView – Сигнал.

**V. Turupalov, I. Molokovskiy, R Abramov**

**Donetsk National Technical University**

**The Process of Radio Waves Propagation in Telecommunication Network of Special Purpose.**

Wireless local area networks are increasingly popular. They underwent the process of standardization, data rate increased. Today, wireless networks make it possible to provide connectivity to those areas, where cabling is impossible or requires the full mobility. Wireless networks are fully compatible with cable networks. The latest developments in the field of wireless communications have led to the appearance of new devices, which are compatible with IEEE 802.11g. The new equipment can transmit data at the speed of 54 Mbit / s and operates in the 2.4 GHz frequency range.

The author examines the problem of radio signal`s propagation at different frequencies (including 2.4 GHz) in the difficult conditions, i.e. underground network in coal mines. The work of radio systems in mines, tunnels and other underground facilities has a number of features: the strong attenuation of radio waves in rock, depending on the types of rocks, their moisture, electromagnetic field`s frequency, increased requirements to equipment due to high humidity, dust, high explosive, a large variety of underground structure`s options.

Propagation model was constructed and analyzed in difficult underground conditions. All models were made using the LabView software package, which allows estimating the characteristics of a radio signal in the underground part of the coal business. The proposed model allows taking into account the influence of the electrical conductivity and dielectric permeability of the tunnel wall material, different frequencies and outputting power of the radio signal.

Thus we can conclude that:

- The use of high frequency decreases the maximum distance between the transmitting and receiving antennas;
- Reduction of the power of the transmitter reduces the range of radio transmission.

**Keywords:** Model - LabView - Signal.