

## **МЕТОД ОЦЕНКИ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ТЕРМОИЗОЛИРОВАННЫХ ТРУБ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОСЕТЕЙ**

*Талецкий Е.Н.*

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь  
e-mail: back147@yandex.by

*Предложен приближенный метод предварительной оценки частотных свойств непригодной направляющей системы для организации мониторинга состояния предварительно термоизолированных труб. Направляющая система образована элементами труб, помещенных в среду с потерями (грунт). Проведен теоретический анализ, приведены частотные зависимости компонентов постоянной распространения – коэффициента затухания и коэффициента фазы, позволяющие использовать эти характеристики системы для мониторинга состояния теплосетей.*

**Ключевые слова:** мониторинг, трубопровод, ПИ-труба, частотная характеристика, поверхностный импеданс.

### **Введение**

На современном этапе развития теплосетей широкое применение получили предварительно термоизолированные трубы (ПИ-трубы) [1]. Они имеют ряд существенных преимуществ при организации теплоснабжения по сравнению с традиционными способами. Однако использование данного типа труб влечет за собой ряд проблем, требующих решения.

Одной из таких проблем является необходимость контроля и диагностики состояния труб. Для организации мониторинга возможно использование электромагнитных методов. В частности, возможна адаптация под эти нужды *RFID*-технологии [2]. В этом случае труба будет выступать как непригодная направляющая система [3] (линия передачи).

Целью работы является рассмотрение частотных свойств ПИ-труб в грунте и анализ применимости частотных характеристик непригодных направляющих систем для мониторинга состояния трубопроводов теплоснабжения. Чтобы сделать вывод о возможности применения закономерностей распространения электромагнитной волны по исследуемой непригодной направляющей системе с допустимыми для контроля параметрами, необ-

ходимо определить ее частотные характеристики, в частности зависимости коэффициента затухания и коэффициента фазы.

Примером использования в качестве непригодных линий передачи различных коммуникационных систем может служить передача телеметрической информации по линиям электропередач (ЛЭП) [3], а также передача энергии по нефтепроводу [4].

В данной работе непригодные линии передачи в виде системы ПИ-труб в грунте предлагается использовать для диагностики и мониторинга трубопроводов сети теплоснабжения.

### **Описание типовой конструкции предварительно термоизолированной трубы**

Конструктивные особенности рассматриваемых ПИ-труб соответствуют действующим нормативно-правовым актам стран СНГ и ЕС [1, 5, 6]. На рисунке 1а приведена схема типовой конструкции ПИ-трубы. В качестве упрощенной модели для исследования взята система ПИ-труб без учета стыковых соединений. В силу сложности структуры для анализа взята часть трубы (сектор) без проводников-индикаторов системы оперативного дистанционного контроля (рисунк

1б). Эта система является реализацией актуального метода мониторинга, который применяется для контроля состояния ПИ-труб существующих теплосетей [7].

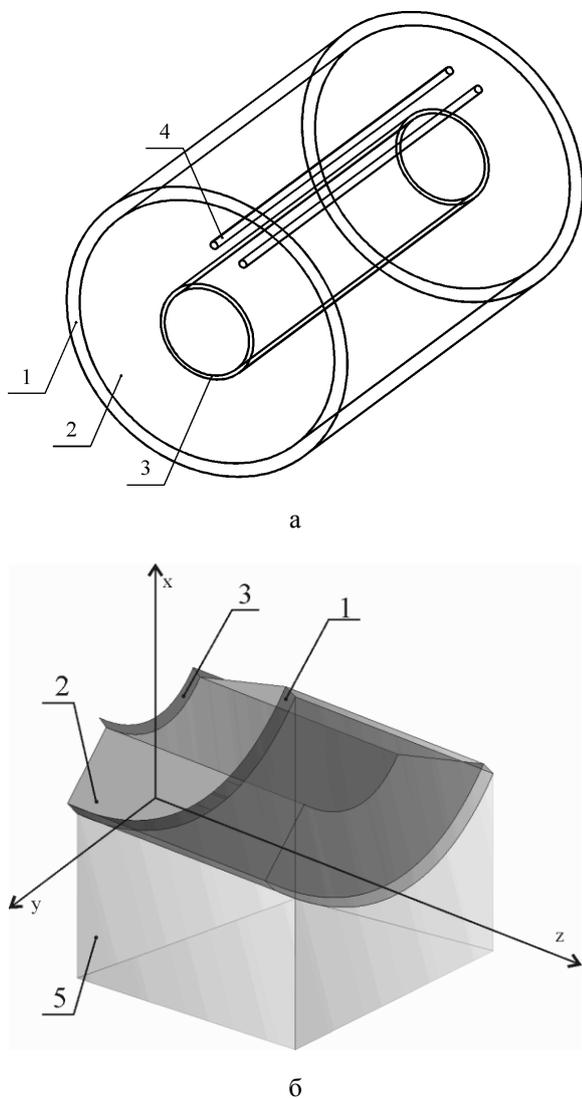


Рисунок 1 – Типовая конструкция ПИ-трубы: а – изображение ПИ-трубы целиком; б – сектор ПИ-трубы; 1 – труба-оболочка; 2 – изоляция из пенополиуретана; 3 – стальная труба; 4 – проводники-индикаторы системы оперативного дистанционного контроля; 5 – грунт

### Результаты и их обсуждение

Одной из основных задач при исследовании структуры ПИ-трубы является учет влияния грунта, заполняющего пространство вокруг трубы, на распространение электромагнитных волн (ЭМВ). В конкретном частном случае в рассмотрении участвует грунт, расположенный непосредственно под трубой (рисунок 1б). Для реше-

ния задачи влияния грунта воспользуемся методом зеркальных отображений [8]. Суть метода заключается в замене конечно-проводящей поверхности на идеально-проводящую поверхность, отнесенную на некоторое комплексное расстояние  $h_1$  (рисунок 2). Метод зеркальных отображений используется, к примеру, для нахождения распределения полей в электровакуумных приборах. Однако он может быть успешно применен для определения частотных свойств многослойных сред. При этом метод зеркальных отображений позволяет учесть как набег фазы, так и затухание амплитуды электромагнитной волны.

Рассмотрим случай распространения ЭМВ вдоль земли (рисунок 2). Существует несколько способов нахождения глубины залегания идеально проводящей поверхности  $h_1$ . Наиболее простой и наглядный – сравнение поверхностных импедансов на уровне  $x = 0$  для двух вариантов (рисунок 3а) [8].

Применительно к методу зеркальных отображений упрощенная модель, изображенная на рисунке 1б, претерпит некоторые изменения. Во-первых, воздух заменен на пенополиуретан: такая замена справедлива ввиду того, что относительная диэлектрическая проницаемость воздуха  $\epsilon_v \approx 1$ , а аналогичная величина для пенополиуретана –  $\epsilon_n = 1,1$ . Результаты проведенной замены приведены на рисунке 3б. Во-вторых, из рассмотрения исключена труба-оболочка (1 на рисунке 1), так как полиэтилен низкого давления, из которого она состоит, имеет относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_{пв} = 2,2-2,3$ , поэтому он оказывает минимальное воздействие на электромагнитную волну, проходящую через него.

Строгое решение задачи о распространении ЭМВ над слоистой средой имеет сложный вид, и его трудно применять для численных расчетов. Но, используя понятие поверхностного импеданса, можно получить приближенное решение [9].

Для варианта А (рисунок 3б) при распространении поперечной электрической волны значение поверхностного импеданса можно определить по следующей формуле [8]:

$$Z_A = \frac{Z_r}{\sqrt{1 - \gamma_n^2 / \gamma_r^2}}, \quad (1)$$

где  $\gamma_n$  – постоянная распространения в пенополиуретане,  $1/м$ , причем  $\gamma_n^2 = -\omega^2 \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_n \epsilon_0$ ;

$\gamma_r$  – постоянная распространения в грунте, 1/м, причем  $\gamma_r^2 = -j\omega\mu_0(\sigma_r + j\omega\epsilon_r\epsilon_0)$ ;  $Z_r$  – волновое сопротивление грунта, Ом, причем  $Z_r = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma_r + j\omega\epsilon_r\epsilon_0}}$ ;  $\omega$  – круговая (циклическая) частота, рад/с;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $\epsilon_n, \epsilon_r$  – относительные диэлектрические проницаемости пенополиуретана и грунта, соответственно;  $\sigma_r$  – проводимость грунта, См/м.

Случай В можно рассмотреть как распространение ЭМВ над двухслойной средой. Методы получения значений поверхностного импеданса для многослойных сред [10] разработаны так же, как и для однородной среды. Они полу-

чаются при расчете падения плоской вертикально поляризованной волны на поверхность раздела.

В этом случае выражение для нахождения поверхностного импеданса имеет вид:

$$Z_B = Z_n \cdot \text{th}(M),$$

причем:

$$M = \sqrt{j2\pi f \mu_0} h_1, Z_n = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_n \epsilon_0}}, \quad (2)$$

где  $Z_n$  – поверхностный импеданс границы раздела пенополиуретан – первый слой (в данном случае также пенополиуретан), Ом;  $f$  – частота ЭМВ, Гц.

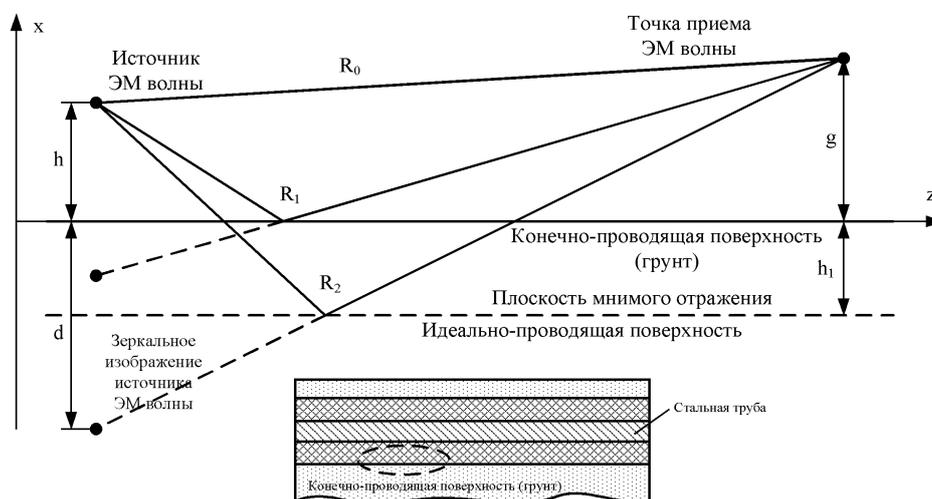


Рисунок 2 – Иллюстрация для пояснения метода зеркальных отображений

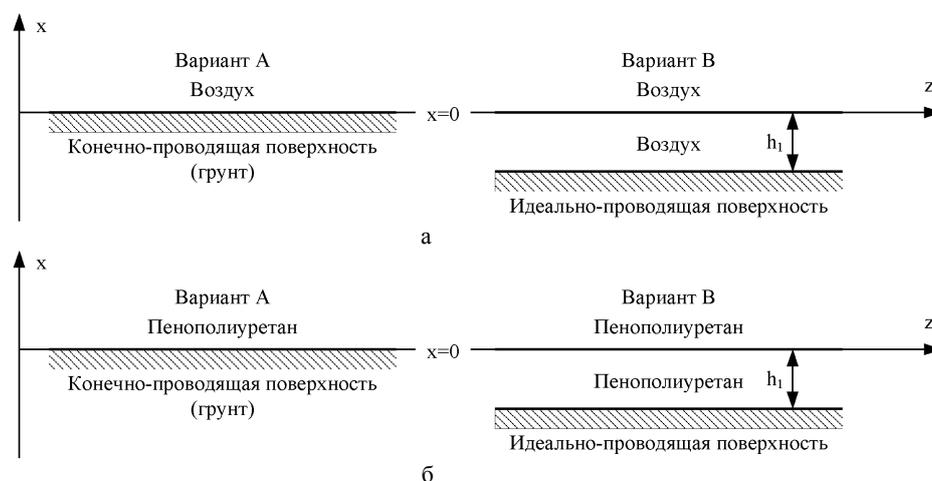


Рисунок 3 – Нахождение глубины залегания идеальной-проводящей поверхности  $h_1$  путем сравнения поверхностных импедансов: а – общий случай; б – результат, полученный применением метода зеркальных отображений

Выражение под квадратным корнем в формуле (2) есть не что иное, как постоянная распространения радиоволн в пенополиуретане:

$$Z_B = Z_n \cdot \text{th}(\gamma_n h_1)$$

Для малых значений  $h_1$  ( $|\gamma_n h_1| \leq 0,5$ )  $\text{th}(\gamma_n h_1) \approx \gamma_n h_1$  [8] и тогда:

$$Z_B = Z_0 \gamma_n h_1 = j\omega \mu_0 h_1. \quad (3)$$

Приравняв правые части выражений (1) и (3) получим формулу для нахождения  $h_1$ :

$$h_1 = \frac{1}{\gamma_n \left(1 - \gamma_n^2 / \gamma_r^2\right)} = \frac{1}{\sqrt{\gamma_r^2 - \gamma_n^2}}. \quad (4)$$

Величина  $h_1$  из выражения (4) представляет собой обратную величину постоянной распространения радиоволн  $\gamma$  в направляющей системе, изображенной на рисунке 1б. Пусть волна в направляющей системе распространяется в сторону возрастающих значений по оси  $z$ . Тогда векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  в любой точке поля представляют следующую функцию от координаты  $z$  [11]:

$$e^{-\gamma z} = e^{-(\alpha + j\beta z)} = 10^{-0,05\alpha^\circ z} e^{-j\beta z} = e^{-z/h_1}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  ( $\alpha^\circ = 8,686 \cdot \alpha$ ) – коэффициент затухания в направляющей системе, 1/м (дБ/м);  $\beta$  – коэффициент фазы в направляющей системе, 1/м.

Выразив  $\gamma = \alpha + j\beta$  из выражения (5) через  $h_1$ :

$$\gamma = \frac{1}{h_1} \Rightarrow \alpha + j\beta = \frac{1}{h_1' + ih_1''}, \quad (5)$$

получим выражения для коэффициента затухания  $\alpha$  (6) и коэффициента фазы  $\beta$  (7):

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2h_1'^2 + h_1''^2 + \frac{h_1'^4}{h_1''^2}}}, \quad (6)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2h_1''^2 + h_1'^2 + \frac{h_1''^4}{h_1'^2}}}, \quad (7)$$

где  $h_1'$  – действительная часть комплексной глубины залегания идеально проводящей поверхности  $h_1$ , м;  $h_1''$  – мнимая часть комплексной глубины залегания идеально проводящей поверхности  $h_1$ , м.

На основании выражений (6) и (7) получены зависимости коэффициента затухания  $\alpha$  (рисунок 4) и коэффициента фазы  $\beta$  (рисунок 5) от частоты для различных состояний грунта. Взяв модуль от выражения (5), получаем амплитудно-частотную характеристику (рисунок 6) неприкосновенной направляющей системы, а взяв аргумент – фазочастотную характеристику (рисунок 7).

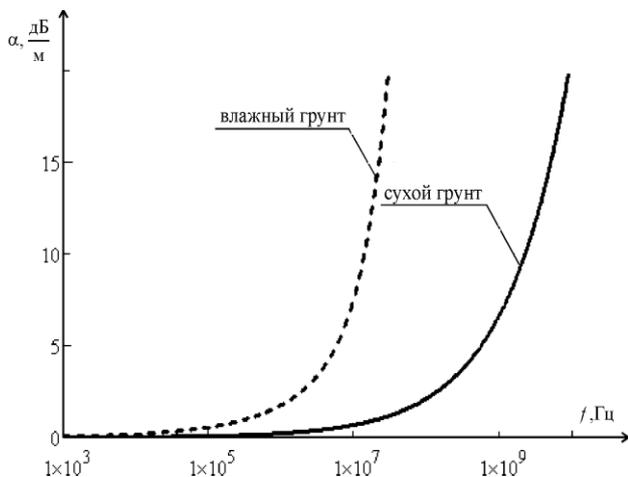


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента затухания  $\alpha$  от частоты

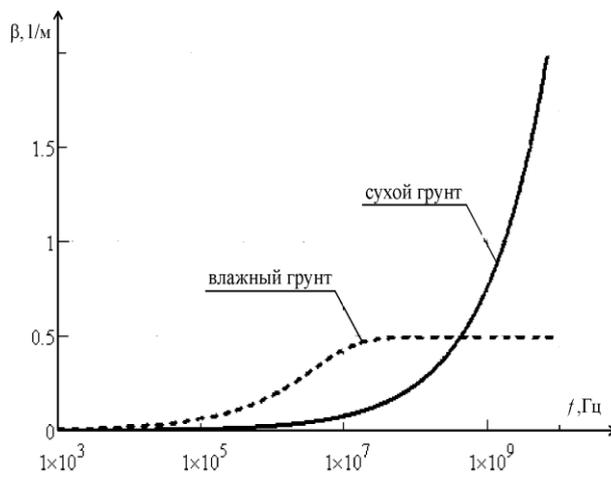


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента фазы  $\beta$  от частоты

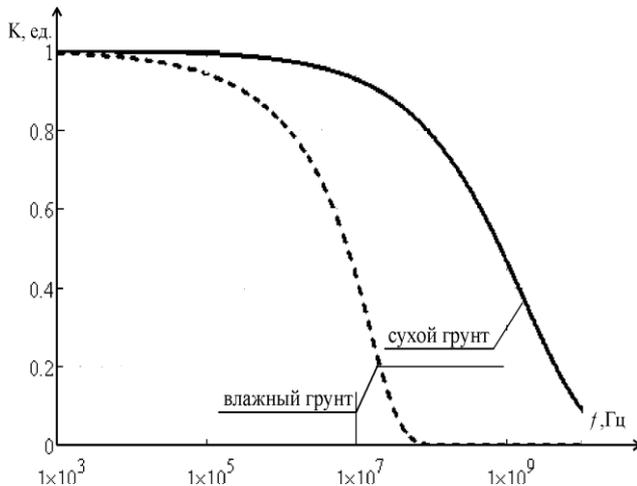


Рисунок 6 – Амплитудно-частотная характеристика неприспособленной направляющей системы

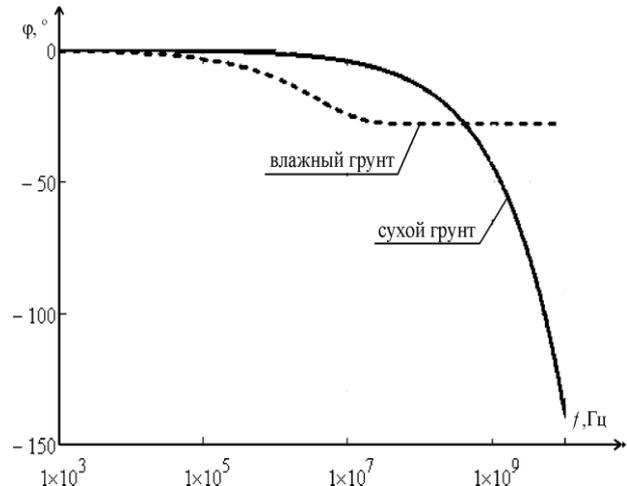


Рисунок 7 – Фазочастотная характеристика неприспособленной направляющей системы

На приведенных графиках (рисунки 4–7) сплошная линия соответствует сухому грунту ( $\epsilon_{сг} = 4,243$ ;  $\sigma_{сг} = 1,483 \cdot 10^{-4}$  См/м), пунктирная – влажному грунту ( $\epsilon_{вг} = 17,321$ ;  $\sigma_{вг} = 9,487 \cdot 10^{-3}$  См/м) [12]. Для построения графиков на рисунках 4–7 использовался программный пакет автоматизированного проектирования *Mathcad*.

Допустимым значением коэффициента затухания  $\alpha$  было принято значение равное 8 дБ/м. Выбор допустимого значения  $\alpha$  обусловлен типовыми параметрами системы *RFID*: мощностью излучения передатчика и величиной чувствительности *RFID*-метки [2]. В качестве расстояния от передатчика до метки взята одна из типовых длин ПИ-трубы (6 м). Таким образом, при значении коэффициента затухания  $\alpha = 8$  дБ/м будет возможно считывание метки расположенной на противоположной от передатчика стороне ПИ-трубы. Из анализа полученных частотных характеристик неприспособленной направляющей системы (рисунки 4–7), образованной системой ПИ-труб в грунте, можно определить допустимый диапазон частот и требуемые параметры оборудования, реализующего *RFID*-технологии, использующегося в системах мониторинга трубопроводного транспорта тепловых сетей.

В процессе мониторинга теплосетей с помощью *RFID*-технологии предполагается использование пассивных *RFID*-меток, расположенных внутри трубы в пространстве между стальной трубой и трубой оболочкой. Тогда для непосредственного контроля состояния труб, можно использовать стандартный *RFID*-считыватель, подключенный к трубе с помощью

специального стыка (например, коаксиального разъема). Критерием для мониторинга является наличие или отсутствие утечек теплоносителя, в данном случае горячей воды, из-за повреждения стальной трубы. Основным преимуществом применения *RFID*-технологий является возможность мониторинга и диагностики трубопроводов в режиме реального времени.

### Заключение

Для мониторинга состояния теплосетей, образованных системой предварительно термоизолированных труб, предлагается использовать *RFID*-технологии. Их применение обосновано анализом частотных свойств неприспособленной направляющей системы с применением метода зеркальных отображений.

Разработана модель неприспособленной направляющей системы, образованной сектором ПИ-трубы и грунтом, позволяющая простыми аналитическими методами проводить анализ частотных свойств двухслойной среды. Анализируемыми параметрами модели являются коэффициенты затухания и фазы, состояния грунта.

Определено допустимое для использования в методах мониторинга трубопровода на основе *RFID*-технологий значение коэффициента затухания, равное 8 дБ/м, обусловленное параметрами оборудования обеспечивающего *RFID*-технологии. Показано, что распространение электромагнитных волн с допустимым значением коэффициента  $\alpha \leq 8$  дБ/м, реализуется на частотах 1 ГГц для сухого грунта и 10 МГц – для влажного.

### Список использованных источников

1. Государственный стандарт Республики Беларусь СТБ 1295-2001. Трубы стальные предварительно термоизолированные пенополиуретаном. – Минск, 2007.
2. *Finkenzeller, K.* RFID Handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication / К. Finkenzeller. – Chichester, UK. – 2010. – 462 p.
3. *Фурсанов, М.И.* Диагностика состояния изоляции ЛЭП 110 кВ под рабочим напряжением / М.И. Фурсанов, Ю.Л. Богатырев, П.В. Крикин // Энергия и менеджмент. – 2011. – № 2. – С. 28–36.
4. Патент 2027260 РФ. Способ создания однопроводной направляющей линии передачи электромагнитных сигналов по трубопроводу, заполненному диэлектриком, например нефтепродуктами / В. Н. Брославец, Г. Г. Гужавин, Г. И. Семенов; опубл. 20.01.1995.
5. European Standard EN 253-2009. District heating pipes – Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks – Pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene. – Brussels, 2009.
6. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30732-2006. Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой. – М., 2007.
7. European Standard EN 14419-2009. District heating pipes – Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks – Surveillance systems. – Brussels, 2009.
8. *Bannister, P.R.* The image theory electromagnetic fields of a horizontal electric dipole in the presence of a conducting half space / P.R. Bannister // Radio Science. – 1982. – № 17. – P. 1095–1102.
9. *Кашпровский, В.Е.* Распространение средних радиоволн земным лучом / В.Е. Кашпровский, Ф.А. Кузубов. – М. : Связь. – 1971. – 220 с.
10. *Бреховских, Л.М.* Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М. : Наука, 1973. – 343 с.
11. *Семенов, Н.А.* Техническая электродинамика : учебное пособие для вузов / Н. А. Семенов. – М. : Связь, 1973. – 480 с.
12. *Никольский, В.В.* Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1989. – 544 с.

---

## METHOD OF ESTIMATION FREQUENCY PROPERTIES OF THE PREINSULATED PIPES FOR MONITORING THE STATUS OF HEATING NETWORKS

*Taletskiy E. N.*

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus  
e-mail: back147@yandex.by

**Abstract.** Proposed approximate method for the preliminary assessment of the frequency properties unadapted guiding system for monitoring the status of the organization of preinsulated pipes. Guide system elements formed tubes placed in a lossy medium (soil). A theoretical analysis shows the frequency dependence of the propagation constant components: the damping coefficient and the phase coefficient, take advantage of these characteristics of the system for monitoring the status heating networks.

**Keywords:** monitoring, pipeline, preinsulated pipe, frequency characteristic, surface impedance.

**References**

1. STB 1295-2001. Pre-heat-insulated steel pipes with polyurethane foam. Minsk, Gosstandart Publ., 2007. 36 p. (In Russian)
2. Finkenzeller K. RFID Handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication. Chichester, John Wiley & Sons Publ., 2010. 462 p.
3. Fursanov M.I., Bogatyrev U.L., Kriskin P.V. [Diagnosis of the state of isolation 110 kV transmission line under operating voltage]. *Energiya i Menedzhment*, 2011, No. 2, pp. 28–36 (In Russian)
4. Broslavets V.N., Guzhavin G.G., Semenov G.I. *Sposob sozdaniya odnoprovodnoy napravlyayushchey linii peredachi elektromagnitnykh signalov po truboprovodu, zapolnennomu dielektrikom, naprimer nefteproduktami* [A method for creating a single-track line of transmission of electromagnetic signals through a pipeline filled with a dielectric such as mineral oil]. Patent RF, No. 2027260, 1995.
5. European Standard EN 253-2009. District heating pipes – Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks – Pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene. Brussels, European Committee for Standardization Publ., 2009. 50 p.
6. GOST 30732-2006. Pipes and fittings of steel with thermal insulation made of polyurethane foam with a protective sheath. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 48 p. (In Russian)
7. European Standard EN 14419-2009. District heating pipes – Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks – Surveillance systems. Brussels, European Committee for Standardization Publ., 2009. 32 p.
8. Bannister P. R. The image theory electromagnetic fields of a horizontal electric dipole in the presence of a conducting half space. *Radio Science*, 1982, vol. 17, pp. 1095–1102.
9. Kashprovskiy V.E., Kuzubov F.A. *Rasprostraneniye srednikh radiovoln zemnym luchom* [Propagation of mid-band radio waves earthly beam]. Moscow, Svyaz' Publ., 1971. 220 p.
10. Brekhovskikh L.M. *Volny v sloistykh sredakh* [Waves in layered media]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 343 p.
11. Semenov N.A. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical electrodynamics]. Moscow, Svyaz' Publ., 1973. 480 p.
12. Nikol'skiy V.V., Nikol'skaya T.I. *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* [Electrodynamics and propagation of radio wave]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 544 p.

*Поступила в редакцию 26.02.2014.*