

УДК 621.396.67

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ С ВТСП

А.И. Лучанинов

Доктор физико-математических наук, профессор*

Контактный тел.: (057) 702-14-30

E-mail: luchan@kharkov.ua

Д.С. Гавва

Кандидат технических наук, доцент*

Контактный тел.: (057) 702-14-30

E-mail: GavvaDS@gmail.com

Е.В. Крикун

Кандидат технических наук, ассистент*

Контактный тел.: (057) 702-14-30

E-mail: elena-krikyn@rambler.ru

Ю.В. Вишнякова

Аспирант*

Контактный тел.: (057) 702-14-30

E-mail: juvalort@gmail.com

*Кафедра основ радиотехники

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

Розглянуто результати дослідження нелінійних ефектів у мікροстрічкових лініях з ВТНП. Показано, що ступінь виявлення нелінійних ефектів залежить як від ширини провідника, так і від товщини підкладки мікροстрічкової лінії

Ключові слова: нелінійність, мікροстрічкова лінія, поверхневий імпеданс

Рассмотрены результаты исследования нелинейных эффектов в микрополосковых линиях с ВТСП. Показано, что степень проявления нелинейных эффектов зависит как от ширины проводника, так и от толщины подложки микрополосковой линии

Ключевые слова: нелинейность, микрополосковая линия, поверхностный импеданс

The results of investigation of nonlinear effects in microstrip lines with htsc are considered. It is shown that the degree of manifestation of nonlinear effects depends on the width of the conductor and the thickness of the substrate microstrip line

Keywords: nonlinearity, microstrip line, surface impedance

1. Введение

Перспективной разновидностью микрополосковых устройств являются электродинамические структуры открытого и закрытого типа с распределенной нелинейностью (ЭСРН), в том числе и с ВТСП. Известные методы анализа электродинамических структур с распределенной нелинейностью в силу своей сложности позволяют строго решить только ограниченный круг задач, либо справедливы для случая «слабой» нелинейности. На наш взгляд, для расчета устройств с распределенной нелинейностью наиболее приемлемым является метод анализа ЭСРН с нелинейностью произвольного вида, основанный на применении нелинейных граничных условий. Для ЭСРН произвольной формы получены системы двумерных нелинейных интегральных уравнений, сформулированных в пространственно-временной области, применение которых расширило круг рассматриваемых задач. Однако решение этих НИУ также весьма затруднено, так как для многих краевых задач функция Грина в пространственно-временной области не определена. На основе предложенного метода и с использованием одномерных НИУ проведены численные исследования влияния нелинейных эффектов в микрополосковых

линиях на характеристики ЭМС (побочное излучение и интермодуляцию) в широком диапазоне при изменении ширины проводника и толщины подложки.

2. Постановка задачи

Рассмотрим микрополосковую структуру, образованную совокупностью из Q проводников S_q . Проводники располагаются на границах раздела многослойной плоскостной среды, материальные параметры p -го слоя которой равны $\epsilon_p, \mu_p, \sigma_p$, общее число слоев равно P . (рис. 1).

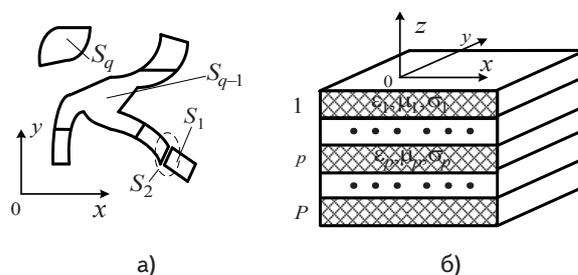


Рис. 1. К постановке задачи моделирования микрополосковой линии

Предполагаем, что в структуру могут быть включены элементы с сосредоточенными параметрами (для примера на рис. 1,а пунктиром показана область разрыва S_2 для подключения сосредоточенного двухполюсного элемента), а сами проводники обладают различными свойствами, то есть в области подключения сосредоточенных элементов выполняется граничное условие (1), а на их поверхности (2).

$$\mathbf{E}_m(\mathbf{r}_k, t) = \frac{1}{\Delta \cdot j_m} F_k [W j_m(\mathbf{r}_k, t)] j_m \quad (1)$$

$$\mathbf{n}(\mathbf{r}) \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)|_S = 0 \quad (2)$$

Для плоскостной среды напряженность полного электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}_p, \omega)$ в p -м слое, созданная на частоте ω проводником S_m с плотностью тока $\mathbf{J}(\mathbf{r}'_q, \omega)$, расположенном в q -м слое, может быть представлена в виде [5-7]:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}_p, \omega) = \iint_{S_m} \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}'_q) \mathbf{J}(\mathbf{r}'_q, \omega) d|\mathbf{r}'_q| + \mathbf{E}^{ct}(\mathbf{r}_p, \omega), \quad (3)$$

где: $\mathbf{E}^{ct}(\mathbf{r}_p, \omega)$ - напряженность поля стороннего источника в точке \mathbf{r}_p . Индекс p или q означает принадлежность тому или иному слою.

Тензорная функция Грина $\tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}'_q)$ в (3) определяется как решение уравнения [7]:

$$\text{rotrot} \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}'_q) - k_p^2 \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}'_q) = -j\omega \mu_q \tilde{\mathbf{I}} \delta(\mathbf{r}_p - \mathbf{r}'_q) \delta_{pq}, \quad (4)$$

где: $k_p^2 = \omega^2 \epsilon_p \mu_p$, $\tilde{\mathbf{I}}$ - единичный тензор, $\delta(\mathbf{r}_p - \mathbf{r}'_q)$ - дельта-функция Дирака, δ_{pq} - символ Кронекера.

Для того чтобы получить интегральные уравнения рассматриваемой задачи, необходимо интегральное представление (3) записать для частот ν_n ($-N \leq n \leq N$) и учесть, что интегрирование должно проводиться по поверхности $S = \bigcup_{q=1}^Q S_q$ всех элементов структуры. В этом случае:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}_p, \nu_i) = \iint_S \tilde{\mathbf{G}}_i(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}'_q) \mathbf{J}(\mathbf{r}'_q, \nu_i) d|\mathbf{r}'_q| + \begin{cases} \mathbf{E}^{ct}(\mathbf{r}_p, \omega_k), & \text{при } \nu_i = \omega_k \\ 0, & \text{при } \nu_i \neq \omega_k \end{cases} \quad (5)$$

Здесь: $\tilde{\mathbf{G}}_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ - тензорная функция Грина слоистой среды на частоте ν_i .

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, \nu_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T}^T \mathbf{n} \times \hat{\mathbf{Z}} \left[\mathbf{r}, \sum_{n=-N}^N \delta_n \mathbf{J}(\mathbf{r}, \nu_n) e^{j\nu_n t} \right] e^{-j\nu_i t} dt \right] \quad \forall \nu_i, i = \overline{-N, N} \quad (6)$$

Подставив (5) в (6), получим систему нелинейных интегральных уравнений относительно распределения комбинационных составляющих тока вдоль проводников структуры в виде:

$$\mathbf{n}_p \times \iint_S \tilde{\mathbf{G}}_i(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}'_q) \mathbf{J}(\mathbf{r}'_q, \nu_i) d|\mathbf{r}'_q| - \mathfrak{S}_i \left\{ \mathbf{n}_p \times \hat{\mathbf{Z}}_N \left[\mathbf{r}_p, \sum_{n=-N}^N \delta_n \mathbf{J}(\mathbf{r}_p, \nu_n) e^{j\nu_n t} \right] \right\} = \begin{cases} \mathbf{n}_p \times \mathbf{E}^{ct}(\mathbf{r}_p, \omega_k), & \text{при } \nu_i = \omega_k \quad \forall i = \overline{0, N} \\ 0, & \text{при } \nu_i \neq \omega_k \end{cases} \quad (7)$$

Здесь \mathbf{n}_p - нормаль к поверхности проводника в точке \mathbf{r}_p . Для сокращения записи опустим в дальнейшем символы p и q для точек наблюдения и интегрирования там, где это не приведет к неоднозначности.

В полученной системе нелинейные свойства описываются вторым слагаемым $\mathfrak{S}_i \{ \hat{\mathbf{Z}}_N [\cdot] \}$ в левой части уравнений. Рассмотрим его более подробно. Так как равенство в (7) должно выполняться для любой точки \mathbf{r} , лежащей на поверхности проводников структуры, то вид $\mathfrak{S}_i \{ \hat{\mathbf{Z}}_N [\cdot] \}$ зависит от свойств проводника в этой точке. Например, если на поверхности проводника выполняются условия Леонтовича, то, используя (7) и переходя к пределу при $T \rightarrow \infty$, получим:

$$\mathfrak{S}_i \{ \hat{\mathbf{Z}}_N [\cdot] \} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Z_s(\mathbf{r}, \omega) [\mathbf{n} \times \mathbf{J}(\mathbf{r}, \omega)] \exp(j\omega t) e^{-j\nu_i t} d\omega dt = Z_s(\mathbf{r}, \nu_i) [\mathbf{n} \times \mathbf{J}(\mathbf{r}, \nu_i)] \quad (8)$$

Видно, что в данном случае $\mathfrak{S}_i \{ \hat{\mathbf{Z}}_N [\cdot] \}$ представляет собой слагаемое, описывающее линейную структуру, проводники которой имеют поверхностный импеданс $Z_s(\mathbf{r}, \nu_i)$. Для структур, содержащих только такие проводники, (7) приобретает вид:

$$\mathbf{n} \times \iint_S \tilde{\mathbf{G}}_k(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}', \omega_k) d|\mathbf{r}'| - Z_s(\mathbf{r}, \omega_k) [\mathbf{n} \times \mathbf{J}(\mathbf{r}, \omega_k)] = \mathbf{n} \times \mathbf{E}^{ct}(\mathbf{r}, \omega_k) \quad \forall k = \overline{0, K}. \quad (9)$$

Это K независимых уравнений, каждое из которых определяет распределение плотности тока на одной из частот внешнего воздействия ω_k . Такие уравнения лежат в основе алгоритмов анализа микрополосковых устройств, используемых в некоторых коммерческих пакетах программ, в частности, Microwave Office, Sonnet, ADS [8,9].

Используя метод Галеркина, систему (4) можно записать следующим образом:

$$\mathbf{Z}(\nu_i) \mathbf{J}(\nu_i) - \mathfrak{S}_i \{ \hat{\mathbf{x}}[\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)] \} = \mathbf{U}^{ct}(\nu_i) \quad \forall i = \overline{0, N}. \quad (10)$$

Система уравнений (10) представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитуд комбинационных составляющих распределения плотности тока на поверхности проводников структуры. Данная система является системой уравнений гармонического баланса для нелинейной цепи, представляющей собой соединение нелинейного многополюсника, описываемого матричным оператором $\hat{\mathbf{x}}[\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)]$, линейного многополюсника, описываемого матрицей собственных и взаимных сопротивлений $\mathbf{Z}(\nu_i)$, и системой независимых источников, описываемых вектором $\mathbf{U}^{AB}(\nu_i)$ (рис. 2).

Число входов, соединяющих нелинейный и линейный многополюсники равно $2M$. Общая размерность системы уравнений гармонического баланса для такой цепи равна $2M(2N+1)$.

В данной работе сконцентрируем внимание на рассмотрении некоторых нелинейных характеристик вдоль микрополосковой линии с НПИ.

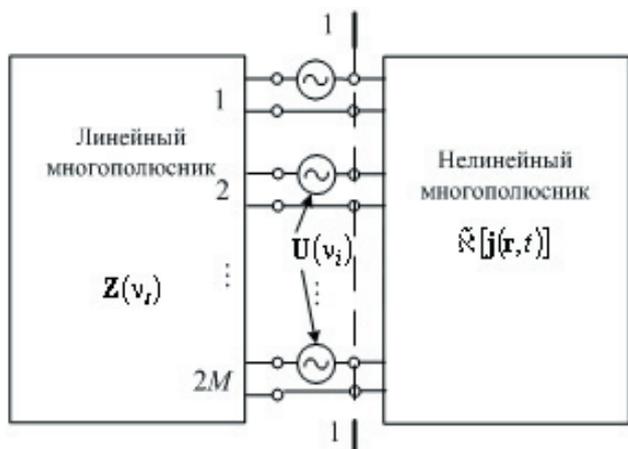


Рис. 2. Эквивалентная схема микрополосковой линии

Также полагается, что поверхностный импеданс имеет индуктивный характер и описывается следующей полиномиальной зависимостью:

$$L(\xi) = L_0(\xi) + L_2(\xi)I(\xi, t)^2, \tag{11}$$

где $L_0(\xi)$ и $L_2(\xi)$ – коэффициенты, которые характеризуют линейные и нелинейные свойства поверхностного импеданса; $I(\xi, t)$ – временная зависимость полного тока в сечении проводника с координатой ξ . В дальнейшем, для сокращения записи, зависимость от продольной координаты опускаем.

3. Результаты исследований

Задача идентификации параметров нелинейных элементов решалась следующим образом. Было выбрано устройство, представляющее собой несимметричную микрополосковую линию, центральный проводник которой имел формулу меандра изготовленного из ВТСП (соединение иттрия и бария) (рис. 3, 5). Для этого устройства имеются достоверные данные о величине интермодуляционных составляющих на выходе микрополосковой линии при подаче на вход двух одинаковых сигналов с близкими частотами f_1 и f_2 . Это же устройство было промоделировано в предположении, что НПИ имеет индуктивный характер и описывается зависимостью (6).

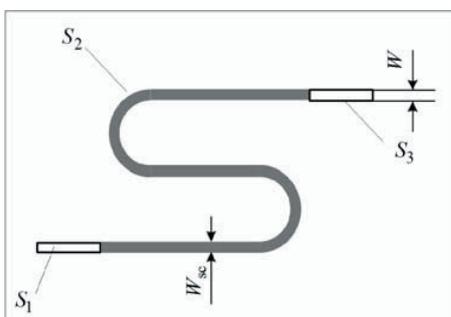


Рис. 3. Эскиз исследуемой микрополосковой линии

При моделировании варьировались коэффициенты L_0 и L_2 . Экспериментальные зависимости практиче-

ски совпадают с результатами моделирования. Это позволяет предположить, что поверхностный импеданс ВТСП описывается зависимостью с коэффициентами $L_0 = 0,00043 \mu\text{H}/\text{m}$ и $L_2 = 0,00013 \mu\text{H}/\text{A}^2\text{m}$, найденными в результате моделирования, которые показаны на рис. 4.

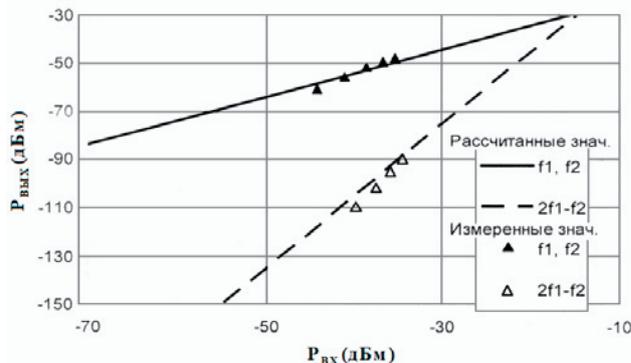


Рис. 4. Результаты исследования интермодуляционных составляющих на выходе микрополосковой линии при варьировании коэффициентов L_0 и L_2

С использованием полученных значений L_0 и L_2 были исследованы нелинейные свойства в микрополосковой сверхпроводящей линии при варьировании ширины проводника W при постоянном значении волнового сопротивления $Z_0 = 50 \text{ } \Omega$.

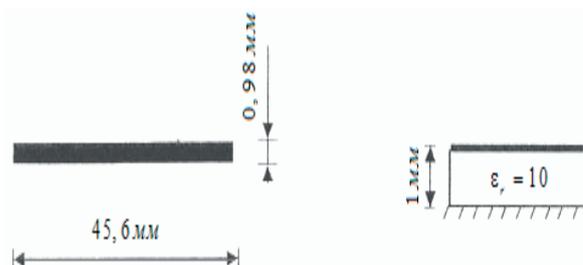


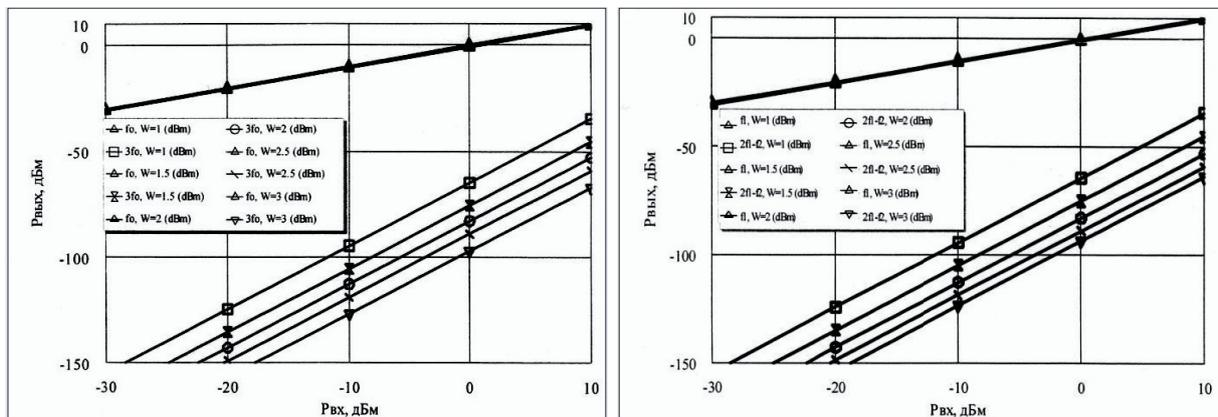
Рис. 5. Параметры исследуемой микрополосковой линии

В результате исследования одночастотного режима возбуждения и рассмотрения выходных сигналов на нагрузке микрополосковой линии были получены результаты, которые изображены на рис. 6.

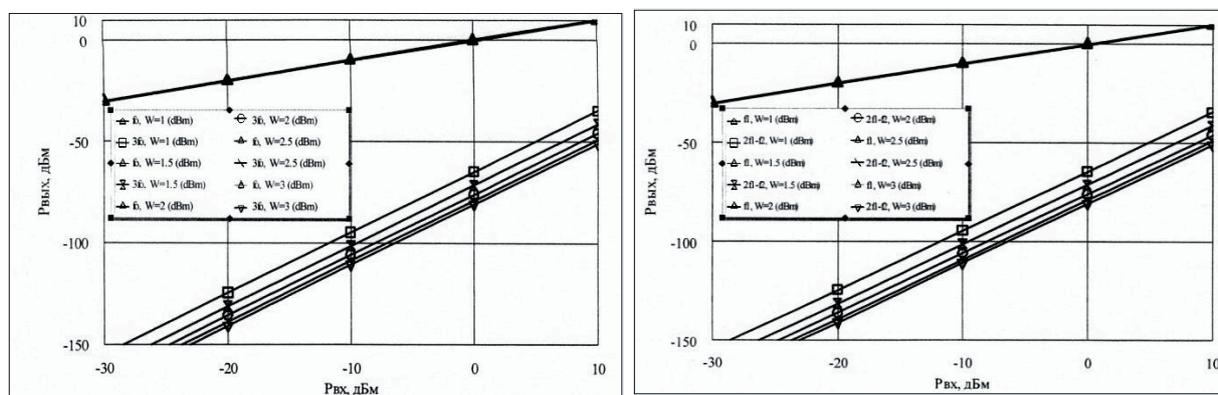
Расчеты показали, что для более широких проводников плотность тока уменьшается и естественно уменьшается влияние нелинейных эффектов (разница до 40 дБ), а изменение уровня интермодуляционных составляющих зависит от ширины проводника, т.е. чем шире проводник, тем плотность тока ниже, и соответственно уменьшаются нелинейные эффекты.

На рис. 7 представлены зависимости, полученные при исследовании нелинейных свойств в микрополосковой сверхпроводящей линии при варьировании ширины проводника W и Z_0 . Значение толщины подложки H фиксировано.

На этих зависимостях видно, что чем шире проводник, тем меньше уровень нелинейных эффектов. Изменение уровня нелинейных эффектов составляет порядка 20 дБ.



а) б)
 Рис. 6. Результаты исследования одночастотного режима возбуждения микрополосковой линии при варьировании ширины проводника W и постоянном значении $Z_0 = 50 \text{ } \Omega$: а) гармонические составляющие 1-го и 3-го порядка; б) интермодуляционные составляющие 1-го и 3-го порядка



а) б)
 Рис. 7. Результаты исследования одночастотного режима возбуждения микрополосковой линии при варьировании ширины проводника W : а) гармонические составляющие 1-го и 3-го порядка; б) интермодуляционные составляющие 1-го и 3-го порядка

4. Выводы

Рассмотрена математическая модель микрополосковых структур с произвольной формой ВТСП проводников. Отмечены некоторые особенности данной модели, в том числе то, что НИУ, описывающие ЭСРН, являются нелинейными уравнениями гармонического баланса для нелинейной цепи. В свою очередь, рассмотренную модель можно представить в виде соединения независимых источников, линейного и нелинейного многополюсников, что делает возможным создание на ее основе более универсальных и эффективных

моделей для анализа характеристик ЭСРН в таких программах как Microwave Office (MWO).

Помимо этого, с помощью MWO решена задача идентификации параметров нелинейных элементов для несимметричной микрополосковой линии с поверхностным импедансом индуктивного характера. Найденные параметры позволили провести исследования нелинейных свойств линии при варьировании ширины проводника и толщины подложки. Как показывают приведенные результаты исследований, степень проявления нелинейных эффектов зависит как от ширины проводника, так и от толщины подложки.

Литература

1. Chang K. Encyclopedia of RF and microwave engineering [Text] / ed. by K. Chang. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005. – Vol. 1–6.
2. Lancaster M.J. Passive microwave device applications of high-temperature superconductors [Text] / M.J. Lancaster. – Cambridge University Press, 1999. – 337 p.
3. Лучанинов А.И. Анализ антенн с распределенными нелинейными свойствами. Часть 1. Использование принципа эквивалентности [Текст] / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, М.А. Омаров, Е.В. Крикун // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Вып. 2/3 (44). – С. 4–7.

4. Collado C. Analysis and Simulation of the Effects of Distributed Nonlinearities in Microwave Superconducting Devices [Text] / C. Collado, J. Mateu, J.M. O'Callaghan // IEEE Trans. on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15. – № 1. – P. 26–39.
5. Панченко Б.А. Микрополосковые антенны [Текст] / Б.А. Панченко, Е.И. Нефедов. – М.: Радио и связь, 1986. – 144 с.
6. Das N.K. A generalized spectral-domain Green's function for multilayer dielectric substrates with application to multilayer transmission lines [Text] / N.K. Das, D.M. Pozar // IEEE Trans. MTT. – 1987. – Vol. 35. – P. 326 – 335.
7. Tan E.L. A Unified Representation of the Dyadic Green's Functions for Planar, Cylindrical and Spherical Multilayered Biisotropic Media [Text] / E.L. Tan, S.Y. Tan // Progress In Electromagnetics Research (PIER). – 1998. – № 20. – P. 75–100.
8. Разевиг В.Д. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office [Текст] / В.Д. Разевиг, Ю.В. Потапов, А.А. Курушин. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
9. Sonnet User's Guide. Release 12 [Text]. – Syracuse, NY: Sonnet Software, Inc. – 2009. – 372 p.

Дана робота присвячена сучасним дослідженням у галузі вимірювань швидкості поширення ультразвуку в рухомих середовищах. Використовується безперервне випромінювання амплітудно - модульованих ультразвукових коливань і фазовий метод вимірювання швидкості поширення звуку. Проаналізована похибка вимірювань

Ключові слова: ультразвукова хвиля, швидкість поширення, вимірювання

Данная работа посвящена современным исследованиям в области измерений скорости распространения ультразвука в движущихся средах. Используется непрерывное излучение амплитудно-модулированных ультразвуковых колебаний и фазовый метод измерения скорости распространения звука. Проанализирована погрешность измерений

Ключевые слова: ультразвуковая волна, скорость распространения, измерения

This work is devoted to contemporary research in the field of measuring of propagation velocity of ultrasonic vibration in the moving. Use continuous emission amplitude-modulated ultrasonic vibrations and the phase method of measuring of propagation velocity of ultrasonic vibration. Measurement error is analyzed

Keywords: ultrasonic wave, propagation velocity, measurements

УДК 534.614

МЕТОД ВЫСОКОТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ

О.В. Зубков

Кандидат технических наук, доцент*

Контактный тел.: 097-232-31-97

E-mail: res@kture.kharkov.ua

К.Н. Полтавский*

Контактный тел.: 095-775-55-61

E-mail: poltava9_1@mail.ru

Г.И. Сидоров

Кандидат технических наук, профессор*

Контактный тел.: 067-793-36-46

E-mail: gennady.sydorov@gmail.com

*Кафедра радиоэлектронных систем

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

В условиях современных промышленных предприятий актуальным является обеспечение постоянного оперативного контроля за ходом технологических процессов экологически опасных производств, когда прямые измерения невозможны или требуют применения большого количества датчиков разных параметров рабочей среды. В некоторых случаях температура и физико-химический состав воздуха в вентиляционных и выводных каналах могут характеризовать отклонение

от нормы хода технологических процессов, индикатором чего может служить величина измеряемой скорости распространения акустических колебаний в исследуемой среде и ее отклонение от типичной для данного типа производства.

2. Постановка задачи

Для высокоточного измерения скорости звука в газах в исследовательских целях используют интер-