

РАДИОВОЛНОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ВЛАЖНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНИЕЙ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЛЬНА

В.А. Дайнеко, канд. техн. наук, доцент, Н.А. Равинский, аспирант,
Е.М. Прищепова, аспирантка (БГАТУ)

Аннотация

Раскрываются основные причины малого процента выхода длинного льноволокна на предприятиях первичной переработки льна. Рассмотрены инфракрасная и микроволновая технологии измерения влажности. Представлен микроволновой измерительный преобразователь влажности для системы управления линией первичной переработки льна на основе несимметричной полосковой линии.

The main reasons of receiving low percent from long flax fiber in the enterprises of primary processing of flax are described. The infrared and microwave moisture measuring technology are considered. Microwave moisture measuring transducer is presented. It is used for the control system through the primary processing of flax on the basis of asymmetric stripline.

Введение

Льняная отрасль является экономически перспективной для Белорусского агропромышленного комплекса. Лен относится к одной из наиболее широко используемых сельскохозяйственных культур. Производство и переработка льна-долгунца имеет большое значение для экономики страны, поскольку данная культура является практически единственным источником получения натурального волокна в республике.

В общем случае технологическая линия получения длинного льняного волокна состоит из следующих машин: сушильной, слоеформирующей и мяльно-трепального агрегата. При существующей технологии и оборудовании удельный вес длинного волокна на предприятиях первичной обработки льна колеблется в пределах 28-32 % (зарубежный уровень доходит до 60 %). В результате обработки сырца на мяльно-трепальном агрегате при неоптимальных условиях, в короткое волокно и отходы уходит значительная часть льноволокна. В настоящее время ведется поиск способов повышения качества и выхода длинного льноволокна.

Основная часть

Главной причиной малого процента выхода длинного льноволокна является низкое качество сырья, поступающего на льноперерабатывающий завод. Существенное влияние на выход длинного волокна оказывают неудовлетворительная степень вылежки тресты, низкая отделяемость и ее высокая влажность.

Кроме того, большое влияние на выход длинного волокна оказала замена технологии уборки льна. Ранее существовала сноповая технология. При такой

уборке льна стебли сортировались по качеству, что позволяло в результате обработки льнотресты получить льноволокно высокого качества. В настоящее время сноповая технология заменена рулонной, с использованием уборочных комбайнов. При данной уборке в рулонах содержится треста, значительно различающаяся по своим свойствам и параметрам.

В результате неоднородности даже отдельных горстей тресты, при любом режиме обработки часть материала будет или недоработана, или сильно повреждена.

Основная проблема заключается в том, что на сегодняшний день на технологических линиях первичной переработки льна льнозаводов республики не существует устройств контроля основных, влияющих на выход длинного волокна, параметров: влажности и отделяемости.

Установленные на заводах машины первичной переработки льна имеют нерегулируемый электропривод.

Для повышения выхода длинного льноволокна необходим непрерывный контроль основных параметров тресты – влажности и отделяемости, с последующим воздействием на рабочие органы машин технологической линии. Обычно изменяют частоты вращения электроприводов рабочих машин, причем регулируемые электроприводы должны быть взаимосвязанными, поскольку изменение частоты вращения электропривода одной машины потребует соответственного изменения частот вращения электроприводов последующих машин.

Существует множество способов определения влажности. Их принято делить на прямые и косвенные. В прямых методах производится непосредственное разделение материала на сухое вещество и влагу.

В косвенных методах измеряется величина, функционально связанная с влажностью материала.

Поскольку требуется непрерывное измерение влажности тресты в потоке без механических и других изменений исследуемого материала, в технологическом процессе применимы косвенные методы измерения влажности волокнистых материалов.

Рассмотрим некоторые современные технологии измерения влажности.

Инфракрасная (ИК) технология непрерывного бесконтактного измерения влажности [1]. Эта технология основана на поглощении определенных цветовых спектров водой.

В настоящее время существует много ИК влагомеров, например поточный инфракрасный влагомер Spectra-Quad [2], который применяется для непрерывного измерения влажности сыпучих материалов, транспортируемых на конвейерной ленте, а также других важных параметров продукта (опционально: жирность, содержание белков и др.).

Spectra-Quad использует технологию, основанную на поглощении света, в области ближнего инфракрасного спектра. Это бесконтактный, неразрушающий, безопасный метод. Химические связи поглощают близкий ИК на хорошо различаемых длинах волн.

Интенсивность поглощения на определённой длине волны пропорциональна содержанию данного вещества в материале.

У данного способа измерения влажности существуют некоторые недостатки: так как ИК влагомеры работают на отражённом свете, они измеряют только влажность поверхности материала, которая и отражает свет. При этом влажность в толще слоя материала остаётся абсолютно неопределённой. В результате ИК влагомеры неприменимы для условий, когда влажность поверхности сильно отличается от влажности в объёме. Для таких задач рекомендуется микроволновая или даже нейтронная (достаточно сложная) технология. Важным недостатком также является относительно высокая стоимость ИК влагомеров по сравнению с влагомерами, использующими другую технологию, например микроволновую.

Другой рассматриваемой технологией является **микроволновая технология** бесконтактного непрерывного измерения влажности [1]. Этот метод основан на измерении диэлектрической проницаемости воды, которая отличается своей аномально большой величиной. По данному параметру можно судить о количестве воды в смеси с другими веществами.

Диэлектрическая проницаемость – это характеристика материала, которая определяет скорость распространения радиоволн в данном материале. Чем больше диэлектрическая проницаемость, тем медленнее распространяется радиосигнал. Измерив время прохождения радиоволн через материал, и зная толщину материала, можно вычислить его диэлектрическую проницаемость. Большинство материалов в су-

хом виде имеют диэлектрическую проницаемость от 2 до 5 (безразмерных единиц), в то время как для воды она равна 81. Если какой-либо материал содержит влагу, то в общую диэлектрическую проницаемость внесёт вклад, как сам материал, так и вода. Поэтому по измеренной диэлектрической проницаемости влажного материала можно определить, какую долю смеси составляет материал, а какую влага. На этом факте и основана работа микроволновых влагомеров.

Радиоволны проходят через весь слой материала, благодаря чему происходит измерение полной влажности, усреднённой по всему объёму материала. При правильной настройке микроволновая технология может работать в условиях, когда влага неравномерно распределена по толще материала (вертикальная сегрегация, высыхание поверхности и др.). Поэтому микроволновая технология применяется в тех условиях, где неоднородность распределения влажности не позволяет использовать ИК технологию.

По микроволновым технологиям также существует достаточно большое количество технических решений. Например, компания Callidan в моделях конвейерных влагомеров внедрила систему бесконтактного измерения высоты насыпи материала, транспортируемого по конвейерной ленте. Благодаря этому влагомер становится полностью независимым от изменений в режиме работы конвейера, продолжая осуществлять точные измерения влажности даже при переменной высоте насыпи. Микроволновой влагомер MOISTSCAN MA-500 [2] производит точные измерения содержания влаги в сыпучих продуктах на конвейерной ленте, что позволяет обеспечивать оптимальную производительность в технологических процессах.

В качестве измерительного преобразователя влажности сыпучих и волокнистых материалов перспективно использование измерительного преобразователя на основе несимметричной полосковой линии (НПЛ) [3].

Печатная технология изготовления полосковых элементов дает возможность конструирования узлов влагомеров, работающих на любом участке сантиметрового диапазона волн и обеспечивает экономичность их массового производства.

Рассмотрим затухание и фазовый сдвиг электромагнитной волны вдоль датчика, представляющего собой отрезок несимметричной полосковой линии, имеющей непосредственный контакт с бесконечным слоем влажного материала (рис.1). Примем, что толщина подложки НПЛ – h , ее диэлектрическая проницаемость – ϵ_l , ширина верхнего проводника НПЛ – a .

Постоянная распространения в НПЛ дается выражением [3]:

$$\gamma = i\omega\sqrt{L_n \cdot C_n}, \quad (1)$$

где L_n и C_n – соответственно погонные индуктивность и емкость НПЛ.

В первом приближении можно считать, что наличие влажного материала (ВМ) не изменяет погонную индуктивность L_n , а оказывает влияние только на емкость C_n . Так как диэлектрическая проницаемость влажного материала является величиной комплексной, то и погонная емкость является в данном случае комплексной величиной:

$$C_n^* = C_n' - i \cdot C_n'' \quad (2)$$

Подставляя выражение (2) в выражение (1) и разлагая в ряд с учетом того, что $C_n^*/C_1 < 1$, имеем:

$$\gamma = i\omega\sqrt{L_n \cdot C_n'} \cdot \left(1 - i \frac{C_n''}{2 \cdot C_n'}\right) \quad (3)$$

Емкость C_n' можно представить в виде суммы:

$$C_n' = C_{n0} + C_{кр} \quad (4)$$

где C_{n0} – погонная емкость линии при отсутствии ВМ; $C_{кр}$ – краевая емкость, обусловленная взаимодействием зарядов, расположенных на верхней стороне полоски НПЛ с зарядами земляной пластинки НПЛ.

Учитывая, что $C_{кр} \leq C_{n0}$, из выражения (4) и (3) получаем:

$$\begin{aligned} \gamma &= i\omega\sqrt{L_n(C_{n0} + C_{кр})} \cdot \left[1 - i \frac{C_n''}{2 \cdot (C_{n0} + C_{кр})}\right] = \\ &= i\omega\sqrt{L_n C_{n0}} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \frac{C_{кр}}{C_{n0}}\right) \cdot \left[1 - i \frac{C_n''}{2 \cdot (C_{n0} + C_{кр})}\right] = \\ &= i\omega\sqrt{L_n C_{n0}} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \frac{C_{кр}}{C_{n0}}\right) + \frac{\omega}{2} \sqrt{L_n C_{n0}} \cdot \\ &\cdot \frac{C_n''}{(C_{n0} + C_{кр})} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \frac{C_{кр}}{C_{n0}}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{Учитывая, что } \gamma = \alpha + i\beta, \quad (6)$$

где α и β – соответственно коэффициенты затухания, и волновое число в НПЛ, находим:

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda_{n0}} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{C_{кр}}{C_{n0}}\right) \cdot \frac{C_n''}{(C_{n0} + C_{кр})} \phi; \quad (7)$$

$$\beta = \beta_{n0} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{C_{кр}}{C_{n0}}\right), \quad (8)$$

где λ_{n0} – длина волны в невозмущенной НПЛ;

β_{n0} – волновое число в невозмущенной НПЛ.

Анализируя выражение (8), находим, что β не может превышать величины $1,5\beta_{n0}$, так как очевидно, что максимальное значение $C_{кр} = C_{n0}$.

Приближенную оценку $C_{кр}$ и C_n'' можно произвести, аппроксимируя силовые линии электрического поля полуокружностями и отрезками прямых, как это показано на рис. 2.

Примем, что силовые линии электрического поля представляют собой полуокружности внутри влажного материала и отрезки прямых линий в диэлектрике полосковой линии. Расположим ось x перпендикулярно оси плоскости НПЛ (рис.2). Тогда погонную емкость участка верхнего проводника шириной d_x можно представить в виде выражения:

$$\Delta C = \frac{\Delta C_1 \cdot \Delta C_2}{\Delta C_1 + \Delta C_2}, \quad (9)$$

причем

$$\Delta C_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_1 dx}{h}, \quad (10)$$

$$\Delta C_2 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_2 dx}{\pi \cdot h}. \quad (11)$$

Подставляя выражение (10) и (11) в выражение (9) и интегрируя, находим:

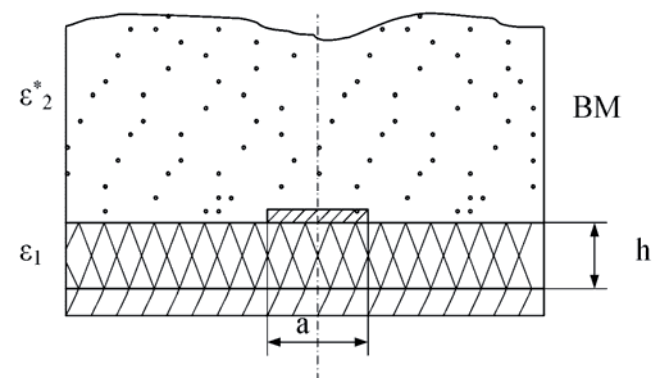


Рис. 1. Схема первичного измерительного преобразователя влажности материала на основе несимметричной полосковой линии

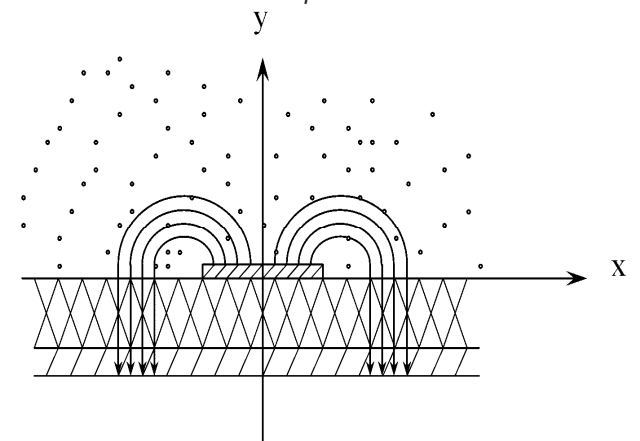


Рис. 2. Распределение силовых линий электрического поля в НПЛ

$$C^* = \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2^*}{\pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot a \cdot \varepsilon_1}{2 \cdot \varepsilon_2^* \cdot h} \right). \quad (12)$$

Учитывая, что для влажных материалов $\operatorname{tg} \delta \leq 0,5$, из выражения (12) получаем:

$$C'' = \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2''}{\pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot a \cdot \varepsilon_1}{2 \cdot \varepsilon_2'' \cdot h} \right); \quad (13)$$

$$C_{кр} = \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2'}{\pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot a \cdot \varepsilon_1}{2 \cdot \varepsilon_2' \cdot h} \right). \quad (14)$$

Очевидно, что

$$C_{n0} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{a}{h}. \quad (15)$$

Комбинируя выражения (12), (13), (14) и (7), находим:

$$N = 8,7 \frac{\rho \cdot l}{\lambda} \left(1 + \frac{\varepsilon_2' \cdot h}{\varepsilon_1 \cdot a} \cdot A \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon_2' + \frac{\varepsilon_1 \cdot a \cdot \pi}{2 \cdot h \cdot a}} \right), \quad (16)$$

где $A = \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_1 \cdot a \cdot \pi}{2 \cdot \varepsilon_2' \cdot h} \right)$.

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda} \left[1 + \frac{\varepsilon_2' \cdot h}{\varepsilon_1 \cdot a} \cdot \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_1 \cdot a \cdot \pi}{2 \cdot \varepsilon_2' \cdot h} \right) \right]$$

$$\left[\frac{\varepsilon''}{\varepsilon_2' + \frac{\varepsilon_1 \cdot a \cdot \pi}{2 \cdot h \cdot \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_1 \cdot a \cdot \pi}{2 \cdot \varepsilon_2' \cdot h} \right)}} \right]. \quad (17)$$

Ширину полоскового проводника можно определить по методике, предложенной в [3]. Для 50-Омной полосковой линии, выполненной на подложке из диэлектрика “флан-2,5” с $\varepsilon_1' = 2,5$ и толщиной 1,5 мм, ширина проводника НПЛ составляет 4,5 мм. Длина волны λ в НПЛ определяется через коэффициент укорочения, который для данного случая равен 1,3 [3].

Результаты расчета ослабления N (дБ/см) в полосковом ПИП влажности материала, произведенного по формуле (17), представлены в виде графиков на рис. 3. Значения ε' и ε'' материала определялись по формулам [4]:

$$\varepsilon' = \left[\Phi \frac{\rho_0 \omega}{\rho_n (1 - \omega)} \left(\sqrt{\varepsilon_n'} - 1 \right) + \Phi \left(\sqrt{\varepsilon_c} - 1 \right) + 1 \right]^2. \quad (18)$$

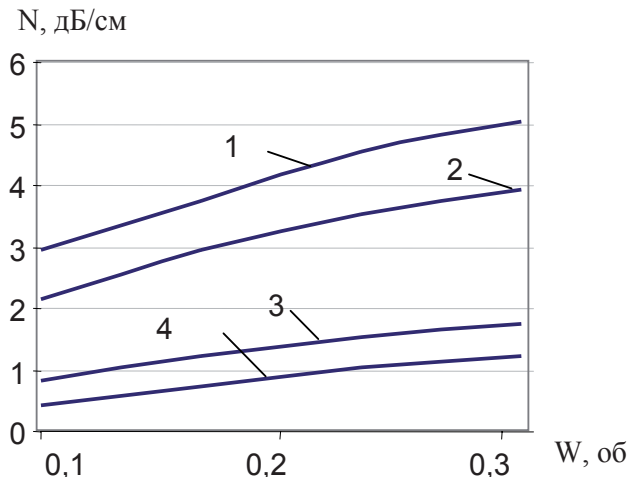


Рис. 3. Зависимости ослабления СВЧ-энергии в полосковом ПИП от объемной влажности материала: 1 – $f = 10$ ГГц; 2 – $f = 8$ ГГц; 3 – $f = 4$ ГГц; 4 – $f = 3$ ГГц

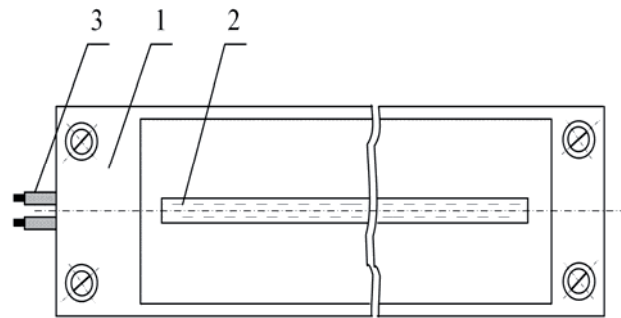


Рис. 4. Конструкция первичного измерительного преобразователя влажности материала на основе несимметричной полосковой линии: 1 – корпус; 2 – проводник НПЛ; 3 – коаксиальный кабель

$$\varepsilon'' = \left[\Phi \frac{\rho_0 \omega}{\rho_n (1 - \omega)} \left(\sqrt{\varepsilon_n'} - 1 \right) + \Phi \left(\sqrt{\varepsilon_c} - 1 \right) + 1 \right] \cdot \frac{\Phi \rho_0 \omega \varepsilon_n''}{\rho_n (1 - \omega) \sqrt{\varepsilon_n'}}. \quad (19)$$

где ε_n' и ε_n'' – действительная и мнимая частота соответственно диэлектрической проницаемости воды; ε_c – диэлектрическая проницаемость сухого материала;

ρ_0 – плотность сухого материала;

ρ_n – плотность воды;

Φ – коэффициент заполнения.

Необходимая чувствительность полоскового измерительного преобразователя (ПИП) достигается изменением длины НПЛ или изменением частоты СВЧ-генератора.

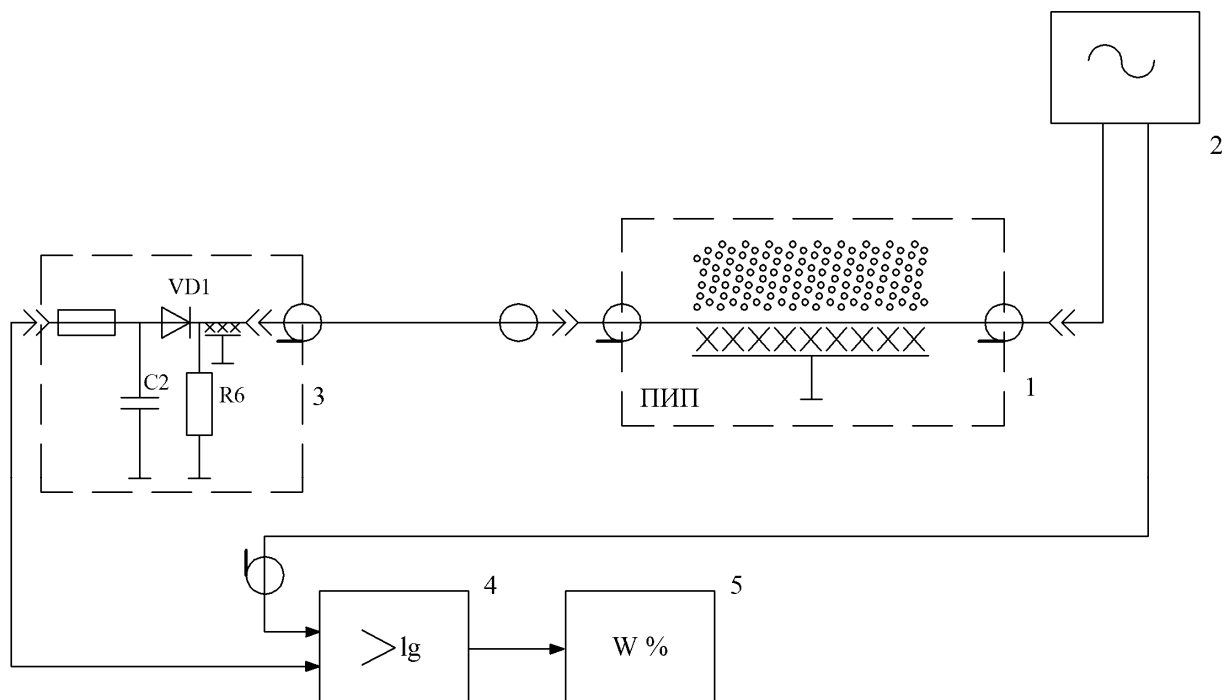


Рис. 5. Схема СВЧ-влажмера исследуемого материала с зондовым ПИП на основе несимметричной полосковой линии: 1 – измерительный преобразователь; 2 – СВЧ-генератор; 3 – детектор СВЧ; 4 – логарифмический усилитель; 5 – дисплей

Диапазон измерения влажности данного СВЧ-влажмера – 0,05 .. 0,3 объемных единиц.

На рис. 4 приведен вариант конструкции первичного измерительного преобразователя влажности, представляющий собой отрезок НПЛ, закрепленный на зонде из нержавеющей стали. Внутри зонда проложены отрезки коаксиального кабеля, соединяющие выводы НПЛ с СВЧ-генератором и детектором. Генератор и детектор СВЧ крепятся непосредственно к зонду. К измерительной схеме от зондового ПИП отводятся провода питания и провод от детектора СВЧ.

Схема СВЧ-влажмера исследуемого материала с зондовым ПИП на основе несимметричной полосковой линии представлена на рис. 5.

Заключение

Существующие на сегодняшний день на заводах республики технологические линии первичной переработки льна не обеспечивают необходимого уровня выхода длинного льноволокна.

Основная причина малого процента выхода длинного льноволокна – неудовлетворительное качество сырья, высокая варьированность свойств тресты (основные свойства – влажность и отделяемость) в рулонах.

Более высокого выхода длинного льноволокна можно добиться путем установки устройств, непрерывно контролирующих влажность льнотресты с целью достижения оптимальной влажности сырья.

В качестве измерительных преобразователей влажности наиболее удобны в эксплуатации полосковые измерительные преобразователи, обеспечивающие непрерывный контроль влажности тресты без механических и других изменений исследуемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В.Клюев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. Влажмеры сыпучих материалов: каталог продукции компании “Konvels” [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://konvels.ru>. – Дата доступа: 14.02.2010.
3. Фельштейн, А.Л. Справочник по элементам полосковой техники/ А.Л. Фельштейн. – М.: Связь, 1979. – 336 с.
4. Ценципер, Б.Л. Исследование диэлектрических свойств твердых влагосодержащих гетерогенных диэлектриков на СВЧ и разработка методов и приборов контроля их влагосодержания: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Б.Л. Ценципер. – Минск, 1986. – 14 с.
5. Berliner M.A. Proc. Microwave Power Symp. Vatterloo, 1975. – PP. 175-182.
6. Устройство для определения влажности: а.с. 1587430 СССР/ И.И. Ренгарт, Б.Л. Ценципер, В.А. Дайнеко, В.К. Бензарь, В.В. Лисовский, А.В. Чубанова; Белорус. ин-т механиз. с.хоз-ва. – № 4391575; заявл. 15.03.88; опубл. 23.08.90 // Офиц. бюл.№31.