

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ НА ОСНОВЕ БИПОЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

**В.С. Осадчук, А.В. Осадчук, Л.В. Крылик**

*Кафедра электроники, Винницкий государственный технический университет  
Хмельницкое шоссе, 95, 21021 Винница, Украина*

### Введение

Среди первичных преобразователей особое место в контрольно-измерительной технике и автоматике занимают датчики влажности. Это обусловлено необходимостью контроля влажности практически во всех отраслях промышленного производства. Однако существующие датчики влажности по своим параметрам таким как точность, чувствительность, масса, габариты и другим не отвечают современным требованиям. Использование частотного принципа работы и микроэлектронной технологии при создании датчиков влажности позволяет увеличить их точность, чувствительность, помехозащищенность, конструктивную, технологическую совместимость с микроэлектронными средствами обработки информации, отказаться от использования аналого-цифровых преобразователей, что существенно снижает себестоимость систем контроля и управления.

Реализация такого принципа работы возможна на основе использования реактивных свойств и отрицательного сопротивления в биполярных структурах, в которых влажочувствительными элементами являются сопротивления на основе гигроскопической соли.

### Математическая модель преобразователя

Известно, что проводимость кристаллической соли значительно ниже проводимости раствора и потому при нулевой влажности соль ведет себя, как полупроводник [1]. Поэтому в основу расчета положена формула для определения сопротивления резистора на тонких полупроводниковых пленках. Резистор изготовлен в виде меандра [2]

$$R = \rho \frac{l}{a \cdot b}, \quad (1)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление;  $l, a, b$  - параметры, которые учитывают геометрию резистора.

С учетом удельной проводимости  $\gamma$ , формула (1) примет вид:

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot a \cdot b}, \quad (2)$$

Установлено, что из окружающей среды своей поверхностью твердые тела поглощают (адсорбируют) молекулы, атомы, а также ионы. Адсорбция газа, водяного пара или же растворенного вещества на поверхности твердого тела протекает произвольно, если в результате адсорбции уменьшается изобарный потенциал поверхности, т.е. адсорбируются на поверхности адсорбента вещества, которые снижают его поверхностное натяжение относительно окружающей среды [4].

Экспериментально было установлено, что во многих системах адсорбируются преимущественно те вещества на поверхности раздела двух фаз, которые по своей полярности занимают промежуточное место между веществами, которые создают эти фазы.

На основе исследований природы адсорбционных процессов сделан вывод о том, что в разнообразных случаях адсорбции играют роль как физические, так и химические взаимодействия между адсорбентом и адсорбтивом. Действие химических сил на чистой поверхности адсорбента проявляется во время поглощения первых порций газа (пара). Заметим, что поверхность твердого тела, т.е. хорошего адсорбента содержит многочисленные ультрамикроскопические выступы и углубления. Кроме того, степень насыщенности валентных сил атомов, расположенных на разнообразных участках поверхности и их способность к взаимодействию с атомами и молекулами окружающего газа разнообразна. В данном случае адсорбция сопровождается выделением значительного количества теплоты – это химическая адсорбция. Укажем, что при подобных процессах возможно изменение свойств поглощенного газа. При более высоких давлениях и при поглощении следующих порций газа интенсивность этих эффектов снижается и преобладают физические факторы. В данном случае поверхностные атомы или ионы адсорбента создают в поверхностном пласте силовое поле и конденсация молекул окружающего газа происходит значительно более легко чем при отсутствии его.

Физическая адсорбция обусловлена тремя составными межмолекулярного притягивания – дисперсионным, ориентационным и индукционным взаимодействиями. Кроме того, при физической адсорбции на поверхности ионных кристаллов основную роль играют

ориентационные и индукционные взаимодействия. Адсорбция в этой области давления благодаря меньшей интенсивности, полной возвратности и меньшему тепловому эффекту есть чисто физическим процессом [4].

Благодаря высокой гидрофильности солей, во время адсорбции водяного пара из окружающей среды возникает процесс электролитической диссоциации, в результате которого молекулы соли расщепляются на катионы и анионы, направленное движение которых под действием электрического поля приводит к увеличению силы тока и температуры датчика. В результате электролитической диссоциации соль из кристаллического состояния переходит в раствор, молярная концентрация которого, а также и степень диссоциации и подвижность носителей заряда зависит от количества адсорбированного водяного пара.

Электропроводность раствора зависит от природы электролита, степени его диссоциации, природы растворителя, от концентрации ионов, подвижности их в растворе и от температуры. Она определяется способностью раствора проводить электрический ток.

Приведем уравнение, которое раскрывает связь удельной проводимости с количеством ионов электролита, которые принимают участие в переносе электроэнергии и скоростью их миграции [5]

$$\gamma = 10^{-3} \cdot \alpha \cdot C_M \cdot F \cdot (n_+ b_+ + n_- b_-), \quad (3)$$

где  $\alpha$  - степень диссоциации электролита: для слабых электролитов  $\alpha \ll 1$ , для сильных -  $\alpha \approx 1$ ;  $C_M$  - молярная концентрация электролита;  $F$  - число Фарадея;  $n_+, n_-$  - зарядовые числа катионов и анионов;  $b_+, b_-$  - подвижности катионов и анионов.

Учтем изменение удельной проводимости датчика в формуле (2) при подстановке (3). В этом случае сопротивление преобразователя описывается формулой

$$R = \frac{l}{10^{-3} \cdot \alpha \cdot C_M \cdot F (n_+ b_+ + n_- b_-) \cdot a \cdot b}. \quad (4)$$

С изменением влажности будет изменяться количество адсорбированного водяного пара, которое учитывается следующим образом. Связь между массовым отношением влаги и давлением пара выражается соотношением [1]

$$\chi = \delta \frac{p_v}{P - p_v}, \quad (5)$$

где  $\delta = M_{H_2O} / M_{\Pi}$  - относительная масса водяного пара по отношению к сухому воздуху при одинаковых давлениях и температурах;  $M_{H_2O} = 18,015$ ,  $M_{\Pi} = 29$  - молекулярные массы водяного пара и сухого воздуха;  $p_v$  - парциальное давление пара при температуре  $T$ ;  $P$  - давление воздуха 101,325 кПа [3].

Температура влажного термометра и давление пара связаны следующим выражением [1]

$$p_v = p_s - A \cdot P(T - T_w), \quad (6)$$

$$A = \frac{c_{p\Pi}}{\delta \cdot L_{T_w}} \cdot \frac{P - p_s}{P}, \quad (7)$$

где  $p_s$  - давление насыщенного пара при температуре  $T$ ;  $A$  - психрометрическая постоянная, которая при  $T_w = 20^\circ\text{C}$  составляет 0,00064;  $T$  - температура окружающей среды;  $T_w$  - температура влажного термометра;  $c_{p\Pi}$  - удельная теплоемкость сухого воздуха (1,006 кДж/кг при  $T = 20^\circ\text{C}$ );  $L_{T_w}$  - скрытая теплота парообразования при температуре влажного термометра  $T_w$ .

Выражение (6) подставим в (5) и получим следующее соотношение [1]

$$\chi = \delta \cdot \left( \frac{p_s - A \cdot P(T - T_w)}{P - (p_s - A \cdot P(T - T_w))} \right), \quad (8)$$

Рассчитаем массу сухого воздуха в исследуемом объеме. Нормальные условия для газов: температура  $0^\circ\text{C}$ , давление 101,325 кПа. При нормальных условиях объем 1 г - моль газа составляет 22,416 дм<sup>3</sup> [3].

Масса сухого воздуха

$$G = \frac{0,1204 \cdot P \cdot M_{\Pi} \cdot V}{273,2 + T}, \quad (9)$$

где  $V$  - объем, который занимает данная масса газа.

Зная массу сухого воздуха в данном объеме и связь между массовым отношением влаги и давлением пара, рассчитаем массу адсорбированного водяного пара

$$m_{\text{ПАРА}} = G \cdot \chi, \quad (10)$$

Увеличение относительной влажности  $W$  окружающей среды приводит к увеличению количества адсорбированного водяного пара, который в свою очередь, приводит к увеличению степени диссоциации  $\alpha$  и молярной концентрации  $C_M$  [5]

$$C_M = \frac{(m_{\text{СОЛИ}} + m_{\text{ПАРА}})}{\mu_{\text{СОЛИ}} \cdot V_{\text{РАСТВОРА}}}, \quad (11)$$

где  $m_{\text{СОЛИ}}$  - масса соли;  $m_{\text{ПАРА}}$  - масса пара;  $\mu_{\text{СОЛИ}}$  - молярная масса соли;  $V_{\text{РАСТВОРА}}$  - объем раствора.

С учетом (8), (9), (10) и (11) формула (4) примет вид

$$R = \frac{l}{\left( m_{\text{СОЛИ}} + \delta \cdot G \cdot \left( \frac{p_s - A \cdot P(T - T_w)}{P - (p_s - A \cdot P(T - T_w))} \right) \right)} \times \frac{1}{10^{-3} \cdot \alpha \cdot 0,23 \cdot F (n_+ b_+ + n_- b_-) \cdot a \cdot b}, \quad (12)$$

Согласно выражению (12) было рассчитано сопротивление влагочувствительного резистивного элемента для пленок гигроскопических солей LiCl, NaCl с помощью пакета прикладных программ "Matlab 5.2". На рис.1. представлена зависимость сопротивления влаго-

чувствительного резистивного элемента при изменении относительной влажности воздуха от 0 до 100%.

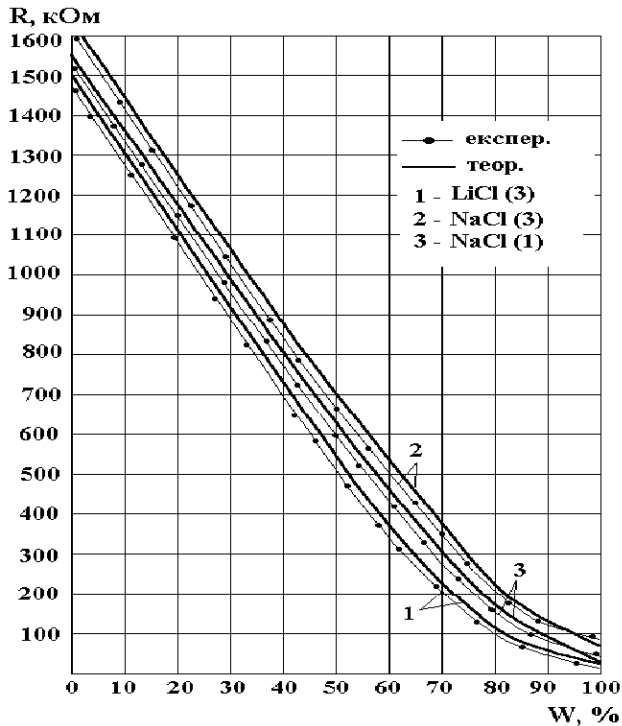


Рис.1. Теоретическая и экспериментальная зависимость сопротивления влагочувствительного резистивного элемента при изменении относительной влажности воздуха

Влагочувствительный резистор изготовлен на ситаловой подложке размером  $0,7 \times 0,9$  мм, на поверхности которой нанесена пленка меди для обеспечения условий пайки проводников. Далее на поверхности медного покрытия с помощью фотолитографии вытравлен резистор в виде меандра с геометрией  $7,85 \cdot 10^{-2} \times 150 \cdot 10^{-6} \times 1,2 \cdot 10^{-6}$  м. Влагочувствительной пленкой резистора была гигроскопическая соль. Для создания влагочувствительной пленки использовались разбавленные растворы солей LiCl, NaCl, которые наносилось на поверхность резистора пульверизатором на расстоянии 40-50 см с одним, двумя и тремя покрытиями. Разбавленные растворы солей готовились с учетом растворимости каждого вида соли при комнатной температуре с целью получения на поверхности датчика мелкокристаллического солевого покрытия после испарения воды. Измерение относительной влажности проводились в специальной камере, где размещались датчики влажности с соответствующим солевым покрытием разной толщины. Необходимая относительная влажность в камере создавалась с помощью генератора влажности газа "Полус - 2". По показателям сухого и мокрого термометра аспирационного психрометра определяли значения относительной влажности окружающей среды, при этом измерения проводились при постоянном атмосферном давлении.

Схема преобразователя влажности, которая состоит из гибридной интегральной схемы на основе двух комплементарных биполярных транзисторов, представлена на рис.2. Сопротивление, чувствительной пленкой которого является гигроскопическая соль, подключал-

ся параллельно одному из сопротивлений резистивного делителя. Эквивалентная емкость полупроводниковой структуры и индуктивность  $L_1$  создают колебательный контур, потери энергии в котором компенсируются отрицательным сопротивлением, которое возникает на электродах коллектор - коллектор биполярной структуры.

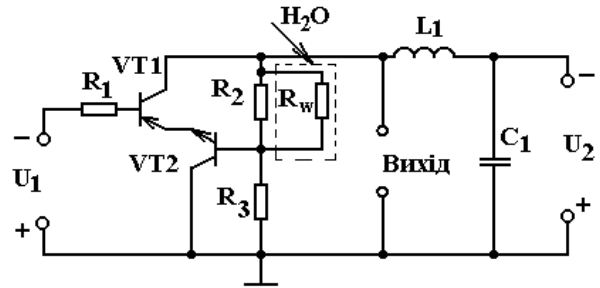


Рис.2. Схема влагочувствительного преобразователя

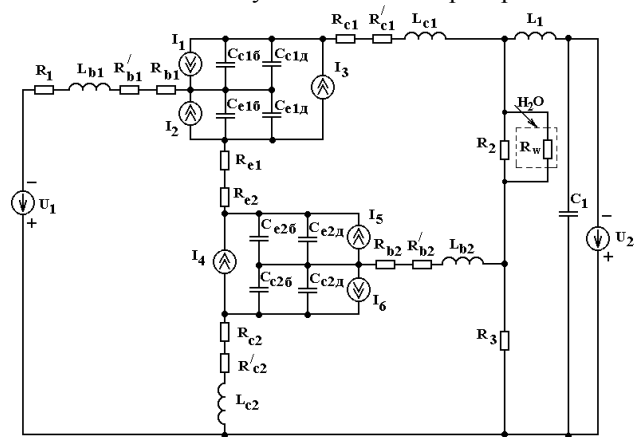


Рис.3. Высокочастотная эквивалентная схема частотного преобразователя влажности

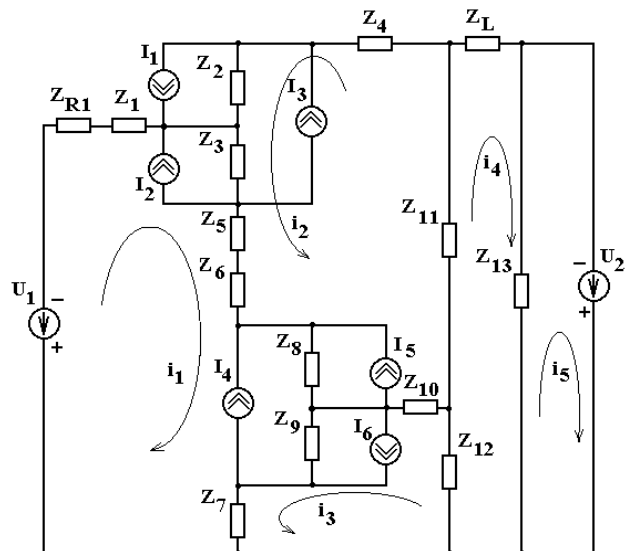


Рис.4. Преобразованная эквивалентная схема преобразователя влажности

С целью изучения характеристик влагочувствительного преобразователя на основе двух биполярных транзисторов в динамическом режиме необходимо рассчитать полное сопротивление структуры на основе

эквивалентной схемы (см.рис.3), которая справедлива для рабочих частот до 300 МГц. Для удобства расчетов эквивалентную схему, которая представлена на рис.3, преобразуем в более компактную (рис.4).

Полное сопротивление на электродах коллектор – коллектор транзисторов VT1 и VT2 можно получить на основе системы уравнений Кирхгофа:

$$\begin{cases} -U_1 = (Z_{R1} + Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_6 + Z_8 + Z_9 + Z_7) \cdot i_1 + \\ + Z_3 \cdot (i_2 + I_2 + I_3) + (Z_5 + Z_6) \cdot i_2 + Z_8 (i_2 + I_4 + I_5) + \\ + Z_9 (i_3 + I_4 - I_6) + Z_7 i_3, \\ 0 = (Z_4 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_6 + Z_8 + Z_{10} + Z_{11}) i_2 + \\ + Z_2 (-I_1 + I_3) + Z_3 (i_1 + I_2 + I_3) + (Z_5 + Z_6) i_1 + \\ + Z_8 (i_1 + I_4 + I_5) - Z_{10} i_3 + Z_{11} i_4, \\ 0 = (Z_7 + Z_9 + Z_{10} + Z_{12}) i_3 + Z_7 i_1 + Z_9 (i_1 + I_4 - I_6) - \\ - Z_{10} i_2 + Z_{12} i_4, \\ 0 = (Z_{11} + Z_{13} + Z_{12} + Z_L) i_4 + Z_{11} i_2 - Z_{13} i_5 + Z_{12} i_3, \\ U_2 = Z_{13} i_5 - Z_{13} i_4, \end{cases} \quad (13)$$

где  $Z_{R1} = R_1$ ,  $Z_1 = R'_{b1} + R_{b1} + j\omega L_{b1}$ ,  $Z_2 = -\frac{1}{j\omega C_{c1}}$ ,

$$Z_3 = -\frac{1}{j\omega C_{e1}}, \quad Z_4 = R'_{c1} + R_{c1} + j\omega L_{c1}, \quad Z_5 = R_{e1},$$

$$Z_6 = R_{e2}, \quad Z_7 = R_{c2} + R'_{c2} + j\omega L_{c2}, \quad Z_8 = -\frac{1}{j\omega C_{e2}},$$

$$Z_9 = -\frac{1}{j\omega C_{c2}}, \quad Z_{10} = R_{b2} + R'_{b2} + j\omega L_{b2}, \quad Z_{12} = R_3,$$

$$Z_{11} = \frac{R_2 R_W}{R_2 + R_W}, \quad Z_{13} = -\frac{1}{j\omega C_1}, \quad Z_L = j\omega L_1,$$

$R'_b$  - омическое сопротивление базового электрода,  $R_b$  - сопротивление базы,  $L_b$  - индуктивность базового электрода,  $C_c$  - емкость коллекторного перехода,  $C_e$  - емкость эмиттерного перехода,  $R'_c$  - омическое сопротивление коллекторного электрода,  $R_c$  - сопротивление коллекторного перехода,  $L_c$  - индуктивность коллекторного электрода,  $R_e$  - сопротивление эмиттерного перехода,  $L_1$  - индуктивность колебательного контура,  $R_W$  - сопротивление резистивного влагочувствительного элемента.

Источники токов  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$  описываются следующими выражениями (2) [6, 7]:

$$I_1 = \frac{I_{bc1}}{\beta_i}, \quad I_2 = \frac{I_{be1}}{\beta_N}, \quad I_3 = \beta I_{едиф1} + \beta_i I_{содф1},$$

$$I_6 = \frac{I_{bc2}}{\beta_i}, \quad I_5 = \frac{I_{be2}}{\beta_N}, \quad I_4 = \beta I_{едиф2} - \beta_i I_{содф2}, \quad (14)$$

где  $I_{bc}$ ,  $I_{be}$  - ток база-коллектор и ток база-эмиттер,  $\beta_i$  - статический коэффициент передачи тока в инверсном режиме,  $\beta_N$  - статический коэффициент пере-

дачи тока в нормальном режиме,  $I_{едиф}$  - диффузная составляющая эмиттерного тока,  $I_{содф}$  - диффузная составляющая коллекторного тока.

### Экспериментальные исследования

Решение системы уравнений (13) с помощью пакета прикладных программ “Matlab 5.2” дало возможность определить полное сопротивление на электродах коллектор–коллектор транзисторов VT1 и VT2 от изменения относительной влажности.

На рис.5 приведена теоретическая зависимость реактивной составляющей полного сопротивления влажочувствительного частотного преобразователя от изменения относительной влажности, которая определяет функцию преобразования.

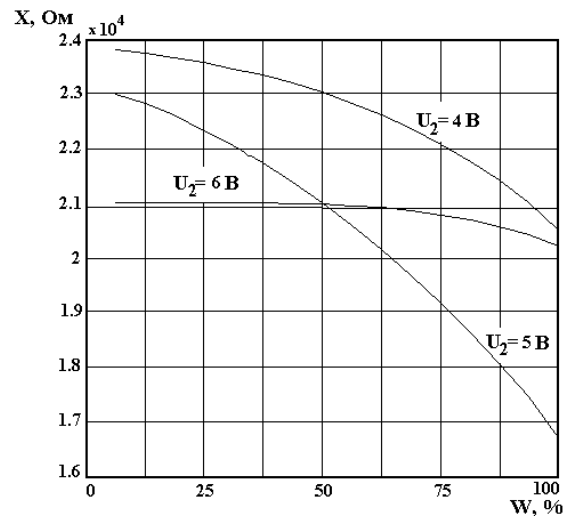


Рис.5. Теоретическая зависимость реактивной составляющей полного сопротивления от относительной влажности окружающей среды

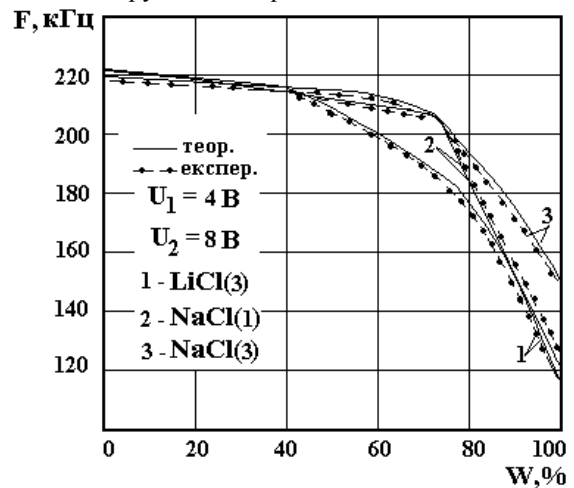


Рис.6. Теоретическая и экспериментальная зависимости частоты генерации влажочувствительного преобразователя от относительной влажности

На рис.6 представлены теоретические и экспериментальные зависимости частоты генерации частотного преобразователя с влажочувствительным резистивным элементом на основе гигроскопических солей LiCl и NaCl от относительной влажности в диапазоне от 0

до 100%. Оценка адекватности математической модели проводилась с помощью относительной погрешности, которая составляла  $\pm 5\%$ .

## Выводы

Предложена математическая модель частотного преобразователя влажности на основе биполярной структуры с отрицательным сопротивлением, чувствительным элементом которого является резистивный влагочувствительный элемент на основе гигроскопических солей LiCl и NaCl. На основе уравнений Кирхгофа получены зависимости реактивной составляющей полного сопротивления преобразователя, частоты генерации от относительной влажности. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов показало, что погрешность математической модели составляет  $\pm 5\%$ .

## Литература

1. Ж. Аш Датчики измерительных систем. В 2-х книгах. – М.: Мир, 1992. – 424 с.
2. Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И., Ильина Э.М., Патрик Н.И. Конструирование и технология микросхем. – М.: Высшая школа, 1984. – 232 с.
3. Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по химии. – К.: Наукова думка, 1974. – 992 с.
4. Киреев В.А. Краткий курс физической химии. – М.: Издательство «Химия», 1978. – 624 с.
5. Справочник по электротехническим материалам. В 3т. Т 1. / Под. ред. Корицкого Ю.В., Пасынкова В.В., Тареева Б.М. Третье переработанное издание. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.
6. Разевиг В.Д. Применение программ P- CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: Выпуск 2: Модели компонентов аналоговых устройств. – Г.: Радио и связь, 1992. – 64 с.
7. Преснухин Л.Н., Воробьев Н.В., Шишкевич А.А. Расчет элементов цифровых устройств. – Г.: Высшая школа, 1991. – 526 с.



Born in 1938, Yaroslavl. Engineer (1962) Kiev Polytechnic Institute, Doctor (1966), Habil Doctor (1979). Professor, Academician of Academy of Engineering Sciences of Ukraine, author of more than 350 proceedings, including 2 monographs, 3 textbooks, 100 patents for the inventions. Head of the Department of electronics of Vinnitsa State Technical University (Ukraine).

Office address: Vinnitsa State Technical University, Chmelnytskyi Road 95, 21021 Vinnitsa, Ukraine; phone 380 432 440013, e-mail: osa@lili.vstu.vinnica.ua

## Prof. Vladimir Stepanovich Osadchuk



Assoc. Prof.

## Alexandr Vladimirovich Osadchuk

Born 1969 in Vinnitsa. Engineer of electronic technology (1993). Doctor (1996). The author of 100 proceedings, including 3 monographs and 30 patents for inventions. The senior scientific employee at the department of electronics of Vinnitsa State Technical University (Ukraine).

Office address: Vinnitsa State Technical University, Chmelnytskyi Road 95, 21021 Vinnitsa, Ukraine; phone 380 432 440833, e-mail: osa@lili.vstu.vinnica.ua



## Ludmila Victorovna Krilik

Born 1968 in Chernovtsi. Engineer of electronic technology (1992). Presently Doctoral student at the department of electronics of Vinnitsa State Technical University (Ukraine). Author of 4 scientific publications. Basic research area: microelectronics frequency converters.

Office address: Vinnitsa State Technical University, Chmelnytskyi Road 95, 21021 Vinnitsa, Ukraine.

**Osadchuk V.S., Osadchuk A.V., Krilik L.V. Analysis of a frequency converter of humidity on the basis of bipolar structure with negative resistance // Electronics and Electrical Engineering. - Kaunas: Technology, 2003. - № 3(44) - С. 54-59.**

In paper analysis a microelectronic converter of humidity are represented on the basis of bipolar transistor structure with negative resistance. Humidity sensitive for an element of the device was a film resistor on the basis of water-absorbing salts NaCl and LiCl. The dependence of resistance as meander from action of damp is calculated, the theoretical and experimental dependences of frequency of generation on damp are given, is shown, that their divergence does not exceed  $\pm 5\%$ . Ill.6, Refs.7 (in Russian; abstracts on English and Russian).

**Осадчук В.С., Осадчук А.В., Крылик Л.В. Исследование частотного преобразователя влажности на основе биполярной структуры с отрицательным сопротивлением // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2003. - № 2(44). – С. 54-59.**

В статье представлены исследования микроэлектронного преобразователя влажности на основе биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Влагодчувствительным элементом устройства служил пленочный резистор на основе гигроскопических солей NaCl и LiCl. Рассчитана зависимость сопротивления в виде меандра от действия влажности, приведены теоретические и экспериментальные зависимости частоты генерации от влажности, показано, что их расхождение не превышает  $\pm 5\%$ . Ил.6, библи.7 (на русском языке; рефераты на английском и русском яз.).