

УДК 621.382

В.С. ОСАДЧУК, О.В. ОСАДЧУК, Л.В. КРИЛИК, О.О. СЕЛЕЦЬКА, В.В. МАРТИНЮК  
Вінницький національний технічний університет

## МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ «ВОЛОГІСТЬ – ЧАСТОТА» З ЄМНІСНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВІ ВОЛОГОЧУТЛИВИХ ПОРИСТИХ ШАРІВ

Розроблено мікроелектронний частотний перетворювач вологості з вологочутливими конденсаторами P14 Rapid (Wired і SMD) фірми «Innovative sensor technology», вологочутливим конденсатором HCH-1000 фірми «Honeywell» та вологочутливим МДН-конденсатором НДІ «Гелій» (м. Вінниця, Україна). Експериментально встановлено, що в діапазоні вимірювання вологості 18÷99% найчутливішим є перетворювач з вологочутливим МДН-конденсатором, виготовленим на основі шару ємнісного елемента, суттєво впливає на чутливість перетворювача вологості та діапазон її вимірювання аморфного кремнію, середнє значення чутливості якого – 3000 Гц/%, діапазон зміни частоти генерації перетворювача – 261 кГц.

Ключові слова: перетворювач вологості, ємнісний елемент, функція перетворення, рівняння чутливості.

V.S. OSADCHUK, A.V. OSADCHUK, L.V. KRYLIK, O.O. SELETSKA, V.V. MARTYNYUK  
Vinnytsia National Technical University

## MICROELECTRONIC HUMIDITY-FREQUENCY TRANSDUCER WITH CAPACITIVE ELEMENTS BASED ON HUMIDITY SENSITIVE POROUS LAYERS

The microelectronic frequency humidity transducer with humidity-sensitive capacitors P14 Rapid (Wired and SMD) Innovative sensor technology company, humidity-sensitive capacitor HCH-1000 Honeywell company and humidity-sensitive MOS capacitor of The Scientific and Research Institute "Helium" (Vinnytsia, Ukraine) has been developed. The microelectronic frequency transducer of humidity forms a transistor structure with a negative differential resistance based on a bipolar transistor and a field two gate transistor. The capacitance of the oscillator circuit of the autogenerator is realized by the capacitive component of the total differential resistance on the electrodes of the collector of the bipolar transistor and the drain of the field two gate transistors. Passive inductance is connected to the collector circuit of the bipolar transistor. Negative differential resistance occurs at the electrodes of the collector of the bipolar transistor and the drain of the field two gate transistor when the voltage of the constant voltage source rises to the desired value. Negative differential resistance compensates for losses in the oscillatory circuit. When the humidity is applied to the humidity sensitive capacitor, the capacitive component of the impedance at the electrodes of the field-effect transistor drain and the collector of the bipolar transistor change, which causes an effective change in the frequency of oscillation circuit generation. The experimental researches show that the transducer with humidity-sensitive MOS capacitor based on amorphous silicon has the highest sensitivity in the range 18÷99% of humidity. Its average sensitivity is 3000 Hz/%, while the range of change of the oscillation frequency is 261 kHz. The essential effect of the circuit design and physical and chemical properties of humidity-sensitive layer of capacitive element on the sensitivity and measuring range of the humidity frequency transducer was proved by theoretical and experimental researching.

Keywords: humidity transducer, capacitive element, the transfer function, the equation of sensitivity.

### Вступ

Сучасний розвиток промислової індустрії вимагає точного виконання технологічних процесів та їх автоматизації. На сьогодні стан економіки визначається розробкою та застосуванням автоматичних засобів технічної діагностики як машин так і обладнання, приладів неруйнівного контролю, систем перевірки якості промислової та сільськогосподарської продукції, контролю параметрів промислових середовищ та довкілля тощо. Ефективність яких, насамперед, залежить від якості первинних перетворювачів, які є основними чутливими елементами вимірювальної техніки. Відповідно до проведеного аналізу, важливою різновидністю вимірювальних первинних перетворювачів є сенсори вологості, оскільки процеси які протікають в промисловості і в повсякденному житті, залежать від вологості [1–7].

Крім того, щоб вимірювання вологості мало високу точність, необхідно застосувати цифрову обробку даних, яка забезпечить підсилення сигналу первинного перетворювача, лінеаризацію передатної характеристики і компенсує початкове зміщення та похибки, які виникають зі зміною температури навколишнього середовища та часового дрейфу.

Отже, розробка твердотільних вимірювальних сенсорів з високими метрологічними характеристиками та вихідним сигналом, незначними похибками вимірювання, є актуальною. А використання реактивних властивостей напівпровідникових структур для розробки мікроелектронних частотних перетворювачів фізичних величин є перспективним напрямком розв'язання цієї проблеми [8–11].

### Теоретичні та експериментальні дослідження

Дана робота є продовженням теоретичних та експериментальних досліджень поданих нами в статті [12].

На сьогодні метою є дослідження нового схематехнічного рішення та вплив його на чутливість до вимірювального параметра та діапазон вимірювання вологості. Нами розроблено мікроелектронний частотний перетворювач вологості у вигляді гібридної інтегральної мікросхеми [13]. Автогенераторний перетворювач утворює транзисторна структура з від'ємним опором на основі біполярного транзистора VT1 та польового двозатворного транзистора VT2. Ємність коливального контуру автогенератора реалізується ємнісною складовою повного диференційного опору на електродах колектор біполярного транзистора VT1 та стік польового двозатворного транзистора VT2. Індуктивність коливального контуру автогенератора – індуктивністю L. Резистори  $R_1$ ,  $R_2$  та  $R_3$  утворюють дільники напруги та забезпечують режим живлення

транзисторів VT1 та VT2. Обмежувальний конденсатор С запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги. Від’ємний опір виникає на електродах колектор біполярного транзистора VT1 та стік польового двозатворного транзистора VT2 при підвищенні напруги джерела постійної напруги до потрібного значення. Він приводить до виникнення електричних коливань в контурі. При дії вологи на вологочутливий конденсатор змінюється ємнісна складова повного опору на електродах стік польового транзистора та колектор біполярного транзистора, що викликає ефективну зміну частоти генерації коливального контуру (рис. 1).

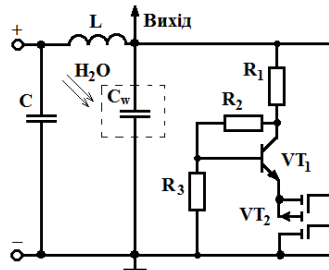


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного частотного перетворювача вологості з ємнісними елементами на основі вологочутливих пористих шарів

Серед великого різноманіття сенсорів вологості значний практичний інтерес набули мікроелектронні сорбційні сенсори вологості. У сенсорах адсорбційного та абсорбційного типів поглинання або виділення вологи сорбентом супроводжується зміною його маси та електрофізичних характеристик – електропровідності, діелектричної проникності тощо [1–7].

Як експериментальні вологочутливі зразки використовувались: вологочутливий МДН-конденсатор на основі аморфного кремнію, розроблений в науково-дослідному інституті (НДІ) «Гелій» (м. Вінниця, Україна); вологочутливий конденсатор НСН-1000 фірми «Honeywell»; вологочутливі конденсатори P14 Rapid (Wired і SMD) фірми «Innovative sensor technology». Вологочутливими шарами досліджуваних конденсаторів фірм «Honeywell» та «Innovative sensor technology» є пористий полімер.

Використовуючи метод Ляпунова [14], на основі електричної схеми перетворювача (рис. 1), по колу позитивного зворотного зв’язку отримано рівняння, на основі якого визначено аналітичний вираз функції перетворення:

$$F = \frac{C(W) \cdot C_{cb} \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \pm \sqrt{M1 + M2 + M3 + M4 + M5}}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot C(W) \cdot C_{cb} \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}}, \quad (1)$$

де  $M1 = C(W)^2 \cdot C_{cb}^2 \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2$ ;  $M2 = 4 \cdot L \cdot C(W) \cdot C_{cb}^2 \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2$ ;  $M3 = 4 \cdot L \cdot C(W)^2 \cdot C_{cb} \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2$ ;  $M4 = 4 \cdot L \cdot C(W)^2 \cdot C_{cb}^2 \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}$ ;  $M5 = 4 \cdot L \cdot C(W)^2 \cdot C_{eb} \cdot C_{cb}^2 \cdot C_{ds}^2$ .

В аналітичних виразах використовувались такі позначення:  $L$  – індуктивність коливального контура;  $C(W)$  – вологочутлива ємність;  $C_{cb}$  – ємність р-п-переходу колектор-база;  $C_{eb}$  – ємність р-п-переходу емітер-база;  $C_{ds}$  – ємність стік-витік.

На основі виразу (1) теоретично розраховано та експериментально досліджено функції перетворення мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливими ємнісними елементами фірм Innovative sensor technology, Honeywell (рис. 2) та вологочутливим МДН-конденсатором, розробленого в НДІ «Гелій» (рис. 3).

З рис. 2, 3 видно, що частота генерації перетворювача зменшується із збільшенням відносної вологості повітря  $W$ . Діапазони зміни частоти генерації розробленого перетворювача вологості (рис. 1) набувають таких значень:

- 84 кГц (вологочутливий конденсатор P14 Rapid (WIRED),  $W = 1 \div 100\%$ );
- 75 кГц (вологочутливий конденсатор P14 Rapid (SMD),  $W = 1 \div 100\%$ );
- 60 кГц (вологочутливий конденсатор НСН-1000,  $W = 0 \div 100\%$ );
- 261 кГц (вологочутливий МДН-конденсатор,  $W = 18 \div 99\%$ ).

Для порівняння наведемо результати досліджень, поданих в статті [12]:

- 103 кГц (вологочутливий конденсатор P14 Rapid (WIRED),  $W = 1 \div 100\%$ );
- 92 кГц (вологочутливий конденсатор P14 Rapid (SMD),  $W = 1 \div 100\%$ );
- 74 кГц (вологочутливий конденсатор НСН-1000,  $W = 0 \div 100\%$ );
- 320 кГц (вологочутливий МДН-конденсатор,  $W = 18 \div 99\%$ ).

Отже, на основі теоретичних та експериментальних дослідженнях встановлено, що нове схемотехнічне рішення, подане на рис. 1 має вужчий діапазон вимірювання вологості в порівнянні з розробкою результати досліджень якої поданні в статті [12].

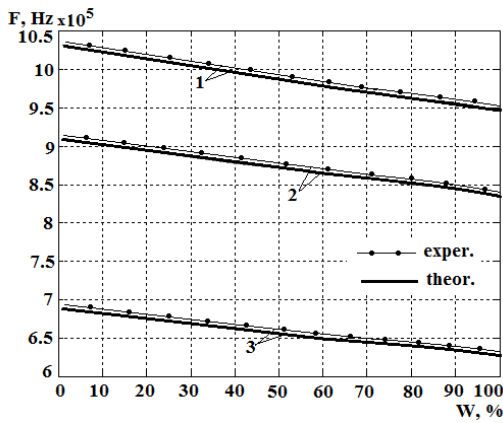


Рис. 2. Експериментальні та теоретичні залежності частоти генерації від зміни відносної вологості повітря перетворювача з вологочутливими конденсаторами: 1 – P14 Rapid (WIRED); 2 – P14 Rapid (SMD); 3 – HCH-1000

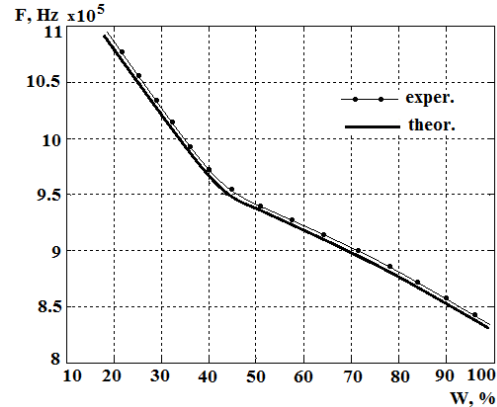


Рис. 3. Експериментальні та теоретичні залежності частоти генерації від зміни відносної вологості повітря перетворювача з вологочутливим МДН-конденсатором

На основі рівняння (1) визначено аналітичний вираз рівняння чутливості (2) розробленого перетворювача:

$$S_W = - \frac{C(W) \cdot C_{cb} \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \pm \sqrt{M1 + M2 + M3 + M4 + M5} \left( \frac{\partial C(W)}{\partial W} \right)}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot C(W)^2 \cdot C_{cb} \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}} +$$

$$+ \frac{C_{cb} \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot \left( \frac{\partial C(W)}{\partial W} \right) \pm \frac{N1 \left( \frac{\partial C(W)}{\partial W} \right) + N2 \left( \frac{\partial C(W)}{\partial W} \right) + N3 \left( \frac{\partial C(W)}{\partial W} \right) + N4 \left( \frac{\partial C(W)}{\partial W} \right) + N5 \left( \frac{\partial C(W)}{\partial W} \right)}{2 \sqrt{M1 + M2 + M3 + M4 + M5}}}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot C(W) \cdot C_{cb} \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}}, \quad (2)$$

де  $N1 = 2 \cdot C(W) \cdot C_{cb}^2 \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2$ ;  $N2 = 4 \cdot L \cdot C_{cb}^2 \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2$ ;  $N3 = 8 \cdot L \cdot C(W) \cdot C_{cb} \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2$ ;  
 $N4 = 8 \cdot L \cdot C(W) \cdot C_{cb}^2 \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}^2$ ;  $N5 = 8 \cdot L \cdot C(W) \cdot C_{cb} \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2$ .

На рис. 4, 5 надано експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості повітря розроблено перетворювача з ємнісними вологочутливими елементами WIRED, SMD, HCH-1000 та МДН-конденсатором.

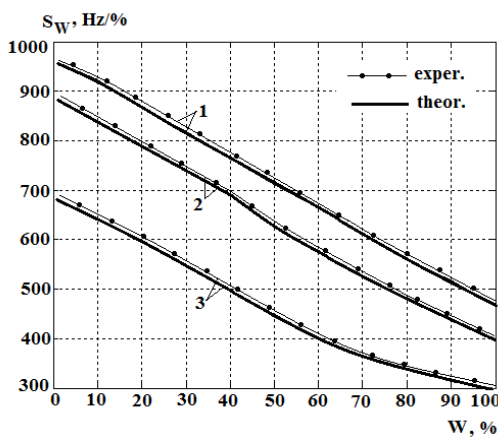


Рис. 4. Експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості повітря перетворювача з вологочутливими конденсаторами: 1 – P14 Rapid (WIRED); 2 – P14 Rapid (SMD); 3 – HCH-1000

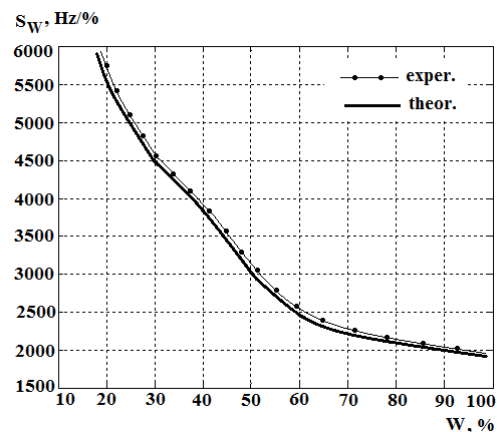


Рис. 5. Експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості повітря перетворювача з вологочутливим МДН-конденсатором

З рис. 4, 5 видно, що чутливість розробленого перетворювача з вологочутливими конденсаторами:  
 – P14 Rapid (WIRED) фірми «Innovative sensor technology», в діапазоні вимірювання  $W = 1 \div 100\%$  змінюється від 959 до 465 Гц/%;  
 – P14 Rapid (SMD) фірми «Innovative sensor technology», в тому ж діапазоні вимірювання  $W$  змінюється від 880 до 400 Гц/%; HCH-1000 фірми «Honeywell», в діапазоні вимірювання  $W = 0 \div 100\%$  змінюється від 682 до 300 Гц/%;

– МДН-конденсатором НДІ «Гелій», в діапазоні вимірювання  $W = 18 \div 99\%$  змінюється від 5900 до 1917 Гц/%.

Провівши порівняння з результатами досліджень поданих в статті [12]:

– P14 Rapid (WIRED) фірми «Innovative sensor technology», в діапазоні вимірювання  $W = 1 \div 100\%$  чутливість змінюється від 1304 до 1000 Гц/%;

– P14 Rapid (SMD) фірми «Innovative sensor technology», в тому ж діапазоні вимірювання  $W$  – від 1077 до 822 Гц/%;

– НСН-1000 фірми «Honeywell», в діапазоні вимірювання  $W = 0 \div 100\%$  – від 835 до 570 Гц/%;

– МДН-конденсатором НДІ «Гелій», в діапазоні вимірювання  $W = 18 \div 99\%$  – від 5730 до 1917 Гц/%, можна зробити висновок, що нова розробка є менш чутливіша до вимірювального параметра – вологості, але має більший вихідний сигнал і кращу сумісність з мікропроцесорною системою обробки даних.

### Висновки

Розроблено мікроелектронний частотний перетворювач вологості з ємнісними вологочутливими елементами фірм «Innovative sensor technology», «Honeywell» та НДІ «Гелій» м. Вінниця. Проведено дослідження електричних параметрів частотного перетворювача та розраховано його теоретичні залежності.

Експериментально встановлено, що середнє значення чутливості розробленого перетворювача з вологочутливими конденсаторами: P14 Rapid (WIRED) фірми «Innovative sensor technology», в діапазоні вимірювання  $W = 1 \div 100\%$  складає 710 Гц/%; P14 Rapid (SMD) фірми «Innovative sensor technology», в тому ж діапазоні вимірювання  $W$  – 630 Гц/%; НСН-1000 фірми «Honeywell», в діапазоні вимірювання  $W = 0 \div 100\%$  – 450 Гц/%. В діапазоні вимірювання вологості  $18 \div 99\%$  найчутливішим є перетворювач з вологочутливим МДН-конденсатором НДІ «Гелій», виготовленим на основі аморфного кремнію, середнє значення чутливості якого – 3000 Гц/%. Теоретично та експериментально доведено, що схемотехнічні рішення та фізико-хімічні властивості вологочутливого шару ємнісного елемента суттєво впливають на чутливість перетворювача вологості та діапазон її вимірювання.

Аналіз проведених теоретичних і експериментальних досліджень показав, що математична модель описує поведінку перетворювача з похибкою  $\pm 1,5\%$ .

### Література

1. Zhi, Chen. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms / Zhi Chen, Chi Lu // *Sensor Letters*. – 2005. – Vol. 3. – P. 274–295. – doi:10.1166/sl.2005.045.
2. Hamid, Farahani. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review / Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon // *Sensors*. – 2014. – № 14. – P. 7881–7939. – doi:10.3390/s140507881.
3. Ashis, Tripathy. Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca,Mg,Fe,Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption / Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman // *Sensors*. – 2016. – № 16. – P. 1135. – doi:10.3390/s16071135.
4. Mario Pelino. Principles and applications of ceramic humidity sensors / Mario Pelino, Carlo Cantalini // *Active and Passive Elec. Comp.* – 1994. – Vol. 16. – P. 69–87.
5. Nathan, Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor / Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder // *Journal of microelectromechanical system*. – february 2010. – Vol. 19. – № 1. – P. 183–191. – doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036584.
6. Bozhi, Yang. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes / Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti // *Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical*. – 30 March 2006. – Vol. 114. – № 1. – P. 254–262.
7. Виноградов М. Ёмкостные датчики влажности фирмы IST AG / М. Виноградов // *Компоненты и технологии*. – 2011. – № 1. – С. 22–24.
8. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем : монографія / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук]. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 1999. – 275 с.
9. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором: монографія / [О. В. Осадчук]. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2000. – 303 с.
10. Бабаян Р. Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом / Р. Р. Бабаян // *Приборы и системы управления*. – 1996. – № 11. – С. 24–26.
11. Сенсори вологості : монографія / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик]. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2003. – 208 с.
12. Osadchuk V. S. A microelectronic humidity-frequency transducer with humidity-sensitive capacitive elements / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk, L. V. Krylik, O. O. Seletska // *Moldavian Journal of the Physical Sciences*. – Chisinau, 2017. – Volume 16, No. 1-2. – P. 94–100.
13. Пат. № 119392 України, МПК G01N 27/12 (2006.01). Пристрій для вимірювання вологості / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Крилик Л. В., Мартинюк В. В., Білилівська О. П. – № u2017 03058 ; заявл. 31.03.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18.

14. Каяцкас А. А. Основы радиоэлектроники / Каяцкас А. А. – М. : Высшая школа, 1988. – 464 с.

#### References

1. Zhi Chen, Chi Lu. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*. 2005. Volume 3, pp. 274–295.
2. Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2014. Volume 14, pp. 7881–7939.
3. Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman. Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca,Mg,Fe,Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption. *Sensors*. 2016. Volume 16, p. 1135.
4. Mario Pelino, Carlo Cantalini. Principles and applications of ceramic humidity sensors. *Active and Passive Elec. Comp.* 1994. Volume. 16. pp. 69–87.
5. Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor. *Journal of microelectromechanical system*. 2010. Volume. 19. Issue 1. pp.183–191.
6. Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes. *Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006. Volume. 114. Issue 1. pp. 254–262
7. Vinogradov M. Emkostny'e datchiki vlazhnosti firmy' IST AG , *Komponenty' i tekhnologii*, 2011, No. 1, pp. 22–24.
8. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V. Reaktyvni vlastyivosti tranzystoriv i tranzystornykh skhem : monohrafiia. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia», 1999, 275p.
9. Osadchuk O. V. Mikroelektronni chastotni peretvoriuvachi na osnovi tranzystornykh struktur z vidiemnym oporom: monohrafiia. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia», 2000, 303 p.
10. Babayan R. R. Preobrazovateli neelektricheskikh velichin s chastotny'm vy'xodom , *Pribory' i sistemy' upravlenyya* 1996. No. 11, pp. 24–26.
11. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Krylyk L. V. Sensory volohosti: monohrafiia. Vinnytsia , «UNIVERSUM – Vinnytsia», 2003, 208 p.
12. Osadchuk V. S., Osadchuk A. V., Krylyk L. V., Seletska O. O. A microelectronic humidity-frequency transducer with humidity-sensitive capacitive elements. Chisinau. *Moldavian Journal of the Physical Sciences*. Volume 16, Issue. 1-2. pp. 94–100.
13. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Krylyk L. V., Martyniuk V. V., Bilylivska O. P. *Prystrii dlia vymyriuvannia volohosti*. Pat. No.119392 Ukrainy, MPK G01N 27/12 (2006.01), Issue 18.
14. Kayatskas A. A. *Osnovy' radyoe'lektroniki*. Moskva, Vysshaya shkola, 1988, p. 464.

Рецензія/Peer review : 27.11.2017 р.

Надрукована/Printed :29.01.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Петрук В. Г.