

## РАЗРАБОТВАНЕ НА МОДЕЛ НА ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ТЪНКОСЛОЕН ЧУВСТВИТЕЛЕН ЕЛЕМЕНТ ЗА ВЛАЖНОСТ

Стефан Иванов, Недю Недев, Звездица Ненова  
*Технически университет - Габрово*

## DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE THIN-FILM HUMIDITY SENSING ELEMENT CHARACTERISTICS

Stefan Ivanov, Nedyu Nedev, Zvezditza Nenova  
*Technical University of Gabrovo*

### Abstract

*The ambient temperature affects the performance of sensors and measuring devices. In the present work, the temperature impact in the range of 20°C to 50°C on the electrical characteristics of titania-silica thin-film humidity sensing elements, prepared via a sol-gel method, are investigated when the relative humidity changes from 20% to 92%. A model of the sensing characteristics based on an artificial neural network, trained on the basis of experimentally measured data, has been developed. At the output of the model information is generated about the values of the sensing element resistance and capacitance while the values of the temperature and the relative humidity are fed to the model inputs. The created model can replace real experimental studies with this humidity sensing element and can be used in the realization of various types of simulations.*

**Keywords:** humidity sensing element, temperature impact, simulation model, artificial neural networks

### ВЪВЕДЕНИЕ

Количеството на влага в атмосферния въздух, а също и в различни твърди течни и прахообразни материали може да оказва както положително, така и отрицателно влияние [1-4]. Това е основната причина влажността да бъде постоянно измервана и контролирана. За тази цел постоянно се разработват нови чувствителни елементи с повишена точност и бързодействие. Широко приложение намират чувствителните елементи за влажност на основата на различни оксидни материали [5-9].

От друга страна температурата на околната среда оказва влияние както върху количеството на влага в атмосферния въздух и различни материали, така и върху работата на сензорните елементи, предназначени за нейното измерване и

контрол, като постоянно се търсят нови решения за намаляване на това влияние [10-13].

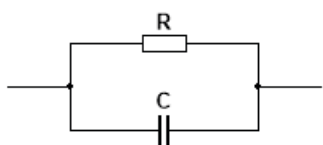
В настоящата работа се изследва влиянието на температурата върху характеристиките на чувствителен елемент за влажност на основата на  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ , легиран с Се, изготвен по зол-гел метод. Разработва се модел на характеристиките на сензорния елемент на базата на изкуствена невронна мрежа, обучена по експерименталните данни при изменение на относителната влажност и температурата на околната среда.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Изследваният тънкослоен чувствителен елемент за влажност е изготвен по зол-гел метод на основата на Titanium

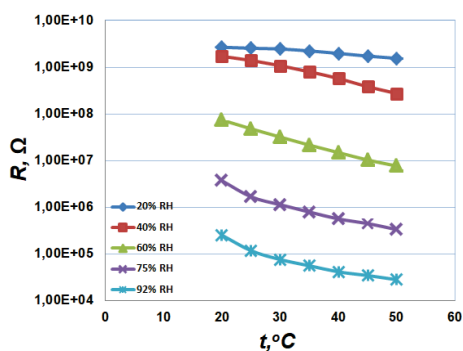
(IV) n-butoxide и Polydimethylsiloxane като прекурсори съответно на  $TiO_2$  и  $SiO_2$  в съотношение 8:2, в присъствие на Се йони и синтерован при  $400^\circ C$  [14].

Сензорният елемент е от оксиден тип, като еквивалентната му електрическа схема представлява паралелно свързани резистор със съпротивление  $R$  и кондензатор с капацитет  $C$  (фиг. 1), които се променят под действие на относителната влажност  $RH$  [14].

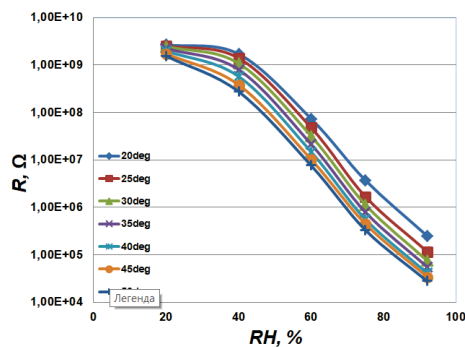


Фиг. 1. Еквивалентна електрическа схема на изследвания чувствителен елемент за влажност

Измерването на електрическите параметри - активно съпротивление  $R$  и капацитет  $C$ , е извършено с Impedance Analyzer Precision LCR Meter MIFA на Zurich Instruments AG, даващ възможност за измерване с точност до 0.05%. Измерванията са проведени при амплитуда на тестовия сигнал 500 mV и честота 20 Hz. Образците са поставяни в камерата на калибратор за влажност и температура HygroGen2-XL на Rotronic Instruments Ltd., осигуряващ контролирана влажност в диапазона от 5% RH до 95% RH с точност 0.1% RH и температура в диапазона от  $0^\circ C$  до  $60^\circ C$  с максимално отклонение  $0.01^\circ C$ .



а)

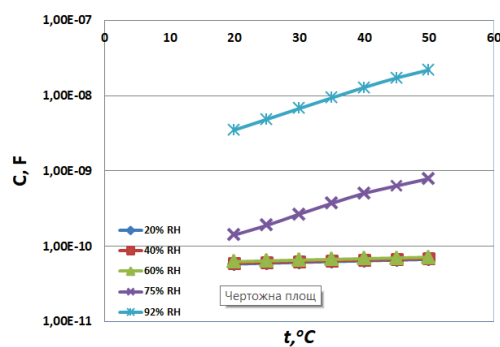


б)

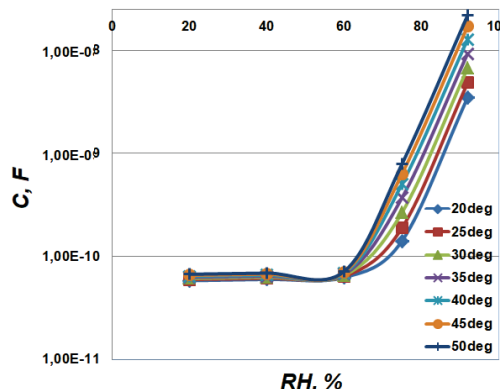
Фиг. 2. Характеристики: а)  $R = f(t^\circ)$  при зададени нива на относителната влажност  $RH$  и б)  $R = f(RH)$  при зададени температури  $t^\circ$

На фиг. 2 са показани графично зависимостите на съпротивлението  $R$  на сензорния елемент от изменението на температурата  $t^\circ$  и от относителната влажност  $RH$ .

Графично зависимостите на капацитета  $C$  на сензорния елемент от изменение на температурата  $t^\circ$  и от относителната влажност  $RH$  са представени на фиг. 3.



а)



б)

Фиг. 3. Характеристики: а)  $C = f(t^\circ)$  при зададени нива на относителната влажност  $RH$  и б)  $C = f(RH)$  при зададени температури  $t^\circ$

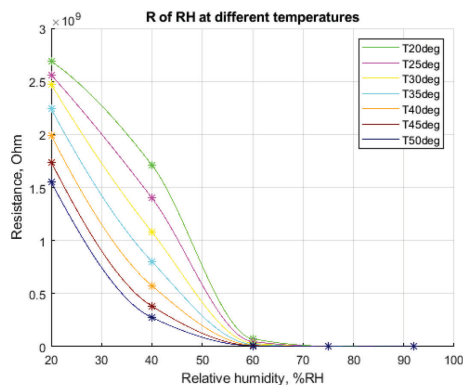
Измерените експериментални данни се използват като опорни точки за създаването на модел, описан чрез изкуствена невронна мрежа.

## МОДЕЛИРАНЕ НА СЕНЗОРНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

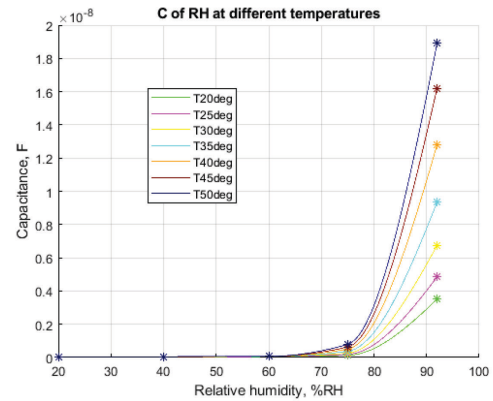
### Подготовка на данните за обучение на изкуствена невронна мрежа

За да се обучи една невронна мрежа е необходимо да се разполага с достатъчен брой обучаващи данни. Поради по-малкия брой експериментални точки, в настоящия случай тези обучаващи данни могат да се получат чрез подходяща интерполация на база на реалните измерени стойности за съпротивлението и капацитета на сензорния елемент.

Експерименталните данни за отделните стойности на температурата са интерполирани посредством РСНІР (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) интерполация, която се характеризира със запазване на формата на изменение на данните. Генерирани са набор от седем масива с интерполирани данни, описващи изменението на съпротивлението  $R$  на сензорния елемент с изменение на стойността на относителната влажност. Генерираните данни са представени на фиг. 4, като върху отделните криви са изобразени и опорните експериментални стойности, въз основа на които е извършено интерполирането. Стъпката, използвана при интерполацията, е 0.01% RH, като за всяка крива са получени по 7201 точки.



Фиг. 4. Интерполирани криви на изменение на съпротивлението на сензорния елемент от влажността при различни температури



Фиг. 5. Интерполирани криви на изменение на капацитета на сензорния елемент от влажността при различни температури

Освен за данните за съпротивлението  $R$ , по подобен начин чрез интерполация са генерирани и стойности за изменение на капацитета  $C$  на сензорния елемент при различни температури и при изменение на относителната влажност със стъпка 0.01% RH. Генерираните данни са представени на фиг. 5.

Генерираните данни за съпротивлението  $R$  и капацитета  $C$  на чувствителния елемент за влажност са обединени в обща извадка, обхващаща над 50 000 обучаващи вектора.

### Обучение и тестване на работата на изкуствена невронна мрежа

За създаване на модела на характеристиките на сензорния елемент е използвана многослойна невронна мрежа с еднопосочно предаване на данните – “feedforward”. Мрежата разполага с три скрити слоя със съответно 4, 16 и 8 неврона в тях и един изходен слой, съдържащ два неврона. Невроните в скритите слоеве имат тангенс сигмоидална функция на трансфер, докато тези в изходния слой са с линейна функция на трансфер.

На двата входа на невронната мрежа постъпват данни за относителната влажност RH и температурата  $t^{\circ}$ , а на двата изхода се получават резултати за стойността на съпротивлението  $R$  и капацитета  $C$  на сензорния елемент при тези стойности на влажността и температурата.

Тъй като стойностите на съпротивлението и капацитета варират в много широки граници (до около 4 порядъка), то при обучението на невронната мрежа се прилага нормализиране на обучаващата извадка. Целта на нормализацията е да се мащабират обучаващите данни и се свие техният обхват. За нормализиране на данните се използва формулата

$$y_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}, \quad (1)$$

където  $y_i$  представлява  $i$ -тата точка от масива с нормализирани данни,  $x_i$  –  $i$ -тата точка от входния масив с ненормализирани данни,  $\mu$  – средната стойност за входния масив и  $\sigma$  – стандартното отклонение за входния масив с данни.

Средната стойност се изчислява като

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2)$$

където  $x_i$  е  $i$ -тата точка от входния масив,  $N$  – броят на точките в масива.

Стандартното отклонение се изчислява чрез формулата

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad (3)$$

където  $x_i$  е  $i$ -тата точка от входния масив,  $N$  – броят на точките в масива, а  $\mu$  е средната стойност.

С помощта на описаните математически изрази е извършена нормализацията на данните за съпротивлението и капацитета.

Обучението на невронната мрежа е извършено с използването на Bayesian Regularization обучаващ алгоритъм в средата Matlab. Тъй като данните за съпротивлението и капацитета варират в широк диапазон и с цел да се минимизира възможно най-много грешката след обучението, то самото обучение е извършено за 20000 итерации. В резултат на това обучение е постигната много малка грешка при валидиране на работата на мрежата –  $3.24 \cdot 10^{-9}$  (табл.1).

Таблица 1. Резултати от обучението на изкуствената невронна мрежа

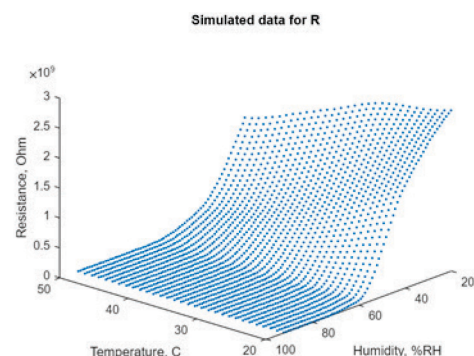
Training Progress			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	20000	20000
Elapsed Time	-	01:32:20	-
Performance	29.5	3.24e-09	0
Gradient	90	9.95e-06	1e-07

След обучението на невронната мрежа, нейната работа е тествана върху обучаващата извадка, като са определени грешките след денормализация при определяне на стойността на съпротивлението  $R$  и капацитета  $C$ . Средните стойности за тези грешки са съответно 0.0008% за  $R$  и 0.07% за  $C$  за диапазона на изменение на относителната влажност от 20% RH до 90% RH.

#### Тестване на изкуствената невронна мрежа с непознати данни

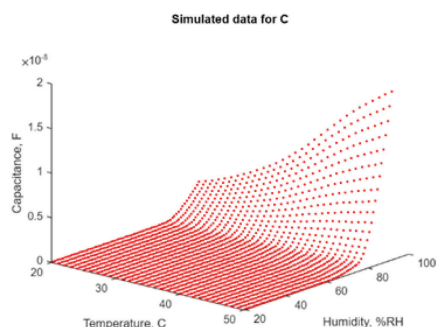
За да се докаже работоспособността на обучената невронна мрежа е необходимо тя да се тества с масив от входни стойности, които не са участвали в процеса на обучение. За тестването е използван масив от 217021 входни вектора, описващи изменението на температурата от 20°C до 50°C със стъпка 0.1°C и изменението на относителната влажност от 20% RH до 92% RH със стъпка 0.1% RH.

На фиг. 6 е представено симулираното от невронната мрежа съпротивление за описания диапазон, като с цел по-добра визуализация на графиката стъпките за температурата и влажността са съответно 1°C и 1% RH.



Фиг.6. Симулиране на съпротивлението, генерирано от изкуствената невронна мрежа за тествания диапазон

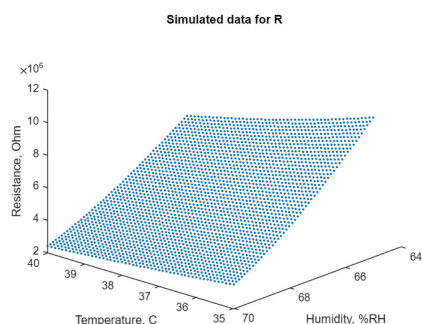
Аналогично е генерирана и графика за изменението на симулираните стойности за капацитета (фиг. 7).



**Фиг. 7.** Симулиране на капацитета, генериран от изкуствената невронна мрежа за тествания диапазон

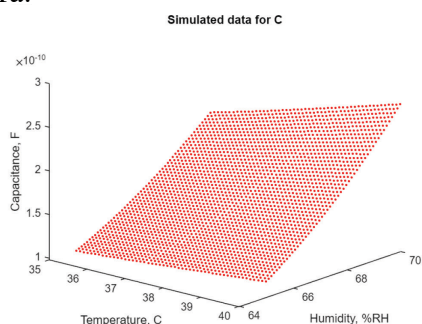
На графиките се наблюдава плавно изменение между съседните стойности.

На фиг. 8, с цел по-добра визуализация на стойностите, е представено изменението на съпротивлението за част от тествания диапазон с използваните в тестваната извадка стъпки - съответно  $0.1^{\circ}\text{C}$  и  $0.1\% \text{RH}$ .



**Фиг. 8.** Визуализиране на част от повърхнината за изменение на  $R$  за тествания диапазон

По подобен начин на фиг. 9 е визуализирана част от повърхнината за капацитета.



**Фиг. 9.** Визуализиране на част от повърхнината за изменение на  $C$  за тествания диапазон

Визуализираният диапазон е подбран в областта, където има стръмна промяна в графиките на характеристиките. Наблюдава се, че изменението е плавно и няма стойности, които рязко да контрастират от околните, т.е. липсват индикации за преобучение на изкуствената невронна мрежа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработен е модел на сензорен елемент за влажност на базата на изкуствена невронна мрежа. Като изходни данни за обучение на невронната мрежа са използвани характеристиките  $R=f(t^{\circ})$ ,  $R=f(RH)$ ,  $C=f(t^{\circ})$  и  $C=f(RH)$  на тънкослоен чувствителен елемент за влажност на основата на  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  в съотношение 8:2, синтерован при  $400^{\circ}\text{C}$ , разработен по зол-гел метод.

На двата изхода наневронната мрежа се получават резултати за стойността на съпротивлението  $R$  и капацитета  $C$  на сензорния елемент при съответни стойности на входните параметри - относителна влажност  $\text{RH}$  и температурата  $t^{\circ}$ .

При невронната мрежа не се наблюдава преобучение, от което следва, че архитектурата и начинът ѝ на обучение са правилно подбрани. От направените тестове може да се заключи, че обучената невронна мрежа може да се използва като модел, симулиращ изменението на съпротивлението и капацитета на тънкослоен чувствителен елемент за влажност при различни стойности на температурата и относителната влажност.

## REFERENCE

- [1] León, M. I., Valentín-Reyes, J., Romero-Castañón, T., Beltrán, J., Flores-Hernández, J. R., & Nava, J. L. Water movement through an anion exchange membrane fuel cell (AEMFC): Influence of gas humidity and flow rate., *Applied Energy*, 2022, 324: 119722.
- [2] Zhong, Z., Chen, Y., Liu, Y., Hou, S., & Geng, J. Study on the influence mechanism of ambient humidity on the temperature rise

- of decay-like composite insulators. High Voltage, 2022, 7(5): 916-924.
- [3] Ding, S., Zhang, M., Ou, Y., & Ma, L. Study on the influence of friction and wear properties of high-speed rail brake materials under humidity environment and temperature conditions. Materials, 2023, 16(4): 1610.
- [4] Safyari, M., Hojo, T., & Moshtaghi, M. Effect of environmental relative humidity on hydrogen-induced mechanical degradation in an Al–Zn–Mg–Cu alloy. Vacuum, 2021; 192: 110489.
- [5] Nunes, D., Pimentel, A., Gonçalves, A., Pereira, S., Branquinho, R., Barquinha, P., Martins, R. Metal oxide nanostructures for sensor applications. Semiconductor Science and Technology, 2019; 34(4): 043001.
- [6] Amanulla, A. Mobeen, Sundaram, R. Green synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles using orange peel extract for antibacterial, cytotoxicity and humidity sensor applications. Materials Today: Proceedings, 2019; 8: p.323-331.
- [7] Gupta, S. P., Pawbake, A. S., Sathe, B. R., Late, D. J., Walke, P. S. Superior humidity sensor and photodetector of mesoporous ZnO nanosheets at room temperature. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019; 293: 83-92.
- [8] Xin Lv, Guojian Y., Caihui F., Tingting L., Highly sensitive humidity sensor based on the solid solution Zr<sub>0.2</sub>Ti<sub>0.8</sub>O<sub>2</sub> nanofibers, Journal of Alloys and Compounds, 2022; 891:161958
- [9] Lanjuan Z., Mengyu W., Zihao L., Jingrun G., Tingting Li, Dongzhi Z., High-performance humidity sensor based on graphitic carbon nitride/polyethylene oxide and construction of sensor array for non-contact humidity detection, Sensors and Actuators B: Chemical, 2021; 344: 13021
- [10] Arman Kuzubasoglu, B. Recent studies on the humidity sensor: A mini review. ACS Applied Electronic Materials, 2022; 4.10: 4797-4807.
- [11] Xu W.; Feng X.; Xing, H. Modeling and analysis of adaptive temperature compensation for humidity sensors. Electronics, 2019; 8.4: 425.
- [12] Korenko, B., Rothhardt, M., Hartung, A., & Bartelt, H. Novel fiber-optic relative humidity sensor with thermal compensation. IEEE Sensors Journal, 2015;15(10): 5450-5454. [13] Islam T., Uddin Z. Gangopadhyay A. Temperature effect on capacitive humidity sensors and its compensation using artificial neural networks. Sensors & Transducers, 2015; 191.8: 126.
- [14] S. Kozhukharov, Z. Nenova, T.Nenov, N. Nedev, M. Machkova. Humidity sensing elements based on cerium doped titania-silica thin films prepared via a sol-gel method. Sensors and Actuators B: Chemical, Sensors and Actuators B, 210 (2015), pp.676–684.