



**Р а з д е л 3**

**ЕЛЕКТРОТЕХНИКА, ЕЛЕКТРОНИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ**

**Section 3**

**ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONICS AND AUTOMATION**

**РАЗПОЗНАВАНЕ НА ГАЗОВЕ С ПОМОЩТА НА ИЗКУСТВЕНИ НЕВРОННИ МРЕЖИ**

**GAS RECOGNITION BASED ON ARTIFICIAL NEURON NETWORKS**

**Звездица Ненова<sup>\*</sup>, Георги Димчев**

*Технически университет – Габрово*

Статията е постъпила на 11.12.2012 г.; приета за отпечатване на 04.02.2013 г.

**Abstract**

*Measuring air parameters is a task of paramount importance associated with protection of environment and human health as well as with providing safe and healthy working conditions. Monitoring of outdoor and indoor air quality often requires gas recognition and measuring gas concentration. This paper proposes a method of gas recognition with compensation of temperature and humidity impact and determining gas concentration based on artificial neuron networks. The method has been implemented by employing metal oxide gas sensors. The effectiveness of its application has been shown for enhancing the reliability of control and accuracy of measurement by compensating the impact of temperature and humidity of environment.*

**Keywords:** gas sensors, recognition, measurement, artificial neural network.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

Измерването на параметрите на въздушната среда е изключително важна задача, свързана с опазването на околната среда и здравето на човека, както и с осигуряването на здравословни и безопасни условия на труд. Атмосферното замърсяване за кратко време може да се разпространява на голяма площ и това изисква непрекъснат мониторинг на газовете замърсявания. Развитието на индустрията, свързано с увеличаване на вредните емисии, неизбежно води до повишаване на изискванията за въвеждане на технологии, които намаляват тези емисии, както и до контрол на средата, в която хората живеят или работят. Във връзка с това се разработват и съответни национални и международни нормативни изисквания за оценка и управление на качеството на околната среда.

Разработват се системи за измерване и контрол на параметри на въздушната среда, системи за контрол на изтичането на газ, следене на качеството на въздушната среда в затворени помещения, разработването и реализацията на системи от типа „електронен нос“ и др. [1-5]. Разпознаването на различните газове е част от задачите, които се решават в тези системи. За целта се използват различни видове класификатори, сред които тези на основата на изкуствените невронни мрежи (ИНМ) имат най-широко приложение [6-10]. ИНМ са използвани за класифициране на различни видове дим [11-14], пожа-

ри [15], аромати [16], газове [17-18] и др.

В тези системи се използват газови сензори като металоокисните [19-23] са най-широко приложими поради своята висока чувствителност, ниска цена и малко време на реакция.

В настоящата работа се предлага метод за разпознаване на газове с компенсиране на влиянието на температурата и влажността и определяне на газовата концентрация на основата на ИНМ. Методът е реализиран при използване на металоокисни газови сензори.

**МЕТОД ЗА РАЗПОЗНАВАНЕ**

За измерване на концентрацията на газове се предлагат металоокисни газови сензори от различни фирми. Повечето от тях имат чувствителност към няколко газа. Ако е възможно замърсяване с различни видове газ и е необходимо да се определи вярно концентрацията им, възниква въпросът за тяхното предварително разпознаване.

Друга особеност на металоокисните газови сензори е, че въпреки големите им предимства, те се влияят от много смущаващи фактори на околната среда, най-основните от които са температурата и влажността. Поради това, задачата за разпознаването на газовете се усложнява от влиянието върху техните характеристики на тези фактори.

Предлаганият метод се основава на използването на

<sup>\*</sup> Тел.: (066 827 376); e-mail: z\_nenova@yahoo.com

отделни ИНМ: за разпознаване на газовете и за определяне на концентрацията, съответно. Всяка една от мрежите работи в два етапа: обучение и реално измерване.

За разпознаването на няколко газа се използват в общия случай  $n$  на брой газови сензори ( $n > 1$ ).

Най-често производителите задават характеристиките на газовите сензори като изменение на отношението  $Rs/Ro$  на съпротивленията

$$(Rs/Ro) = f(Conc, t, RH) \quad (1)$$

където  $Rs$  е съпротивлението на газовия сензор при съответната газова концентрация и условия на околната среда, а  $Ro$  – съпротивлението му при зададена базова концентрация, температура и влажност.

Тези характеристики обаче са зададени най-често само при определени стойности на смущаващите фактори

$$(Rs/Ro)_l = f(Conc) \Big|_{t_l, RH_l = const}, \quad (2)$$

$$l = 1, 2, \dots, p.$$

Трябва да се отбележи, че калибрирането на газовите сензори изисква специализирано оборудване и практически е много трудно да се задават всички желани съотношения между  $t$  и  $RH$  за различните газови концентрации. Затова за определен тип сензори обикновено влиянието на смущаващите фактори се задава посредством характеристиките при фиксирана концентрация

$$(Rs/Ro)_l = f(t_l, RH_l) \Big|_{Conc = const} \quad (3)$$

$$l = 1, 2, \dots, p.$$

Ако при практическото приложение на газовите сензори се избере определена базова характеристика като работна (най-често 20°C/65%RH), това неминуемо води до грешки поради промени в околната среда.

При ИНМ за разпознаване на газ, с цел отчитане на влиянието на факторите на околната среда върху характеристиките на сензорите, в етапа на обучение се предлага използване на набор от характеристики на сензорите в зададени диапазони на изменение на температурата  $t$  и влажността  $RH$ . Тъй като характеристиките (2) са за ограничени съотношения на влияещите параметри, се предлага допълването им с аналитично получени характеристики на базата на функционалната апроксимация на тези експериментални характеристики и отмествания на основата на (3).

На основата на тези характеристики се извършва обучение на ИНМ за разпознаване на газовете, която за определеност по-нататък ще бъде наричана ИНМ1. При това обучение всяка точка, наречена наблюдение - с координати от характеристиките на всички разглеждани сензори, се отнася към определена група  $G_1, G_2, \dots, G_q$ , съответстваща на даден газ като  $q$  е броят на разпознаваните газове.

В процеса на контрол след извършване на измерването на информативния параметър  $(Rs/Ro)_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) на всеки сензор, ИНМ1 класифицира това наблюдение към определена група газ.

След разпознаването на газа и отнасянето му към група  $G_k$  по характеристиките  $(Rs/Ro)_k = f(Conc_k, t, RH)$  само на един от използваните сензори трябва да се определи концентрацията му. За целта предварително се извършва обучение на втора невронна мрежа – ИНМ2 за всяка група газ  $G_k$  при  $k=1, 2, \dots, q$ . В етапа на обучението ѝ се използват характеристиките (1), зададени от производителите. Входни параметри за невронната мрежа са отношението на съпротивлението

$(Rs/Ro)_k$  на даден газов сензор, температурата  $t$  и относителната влажност  $RH$ , а изходен параметър - концентрацията  $Conc_k$  на съответния газ [24]. Обучават се отделни невронни мрежи за всеки газ.

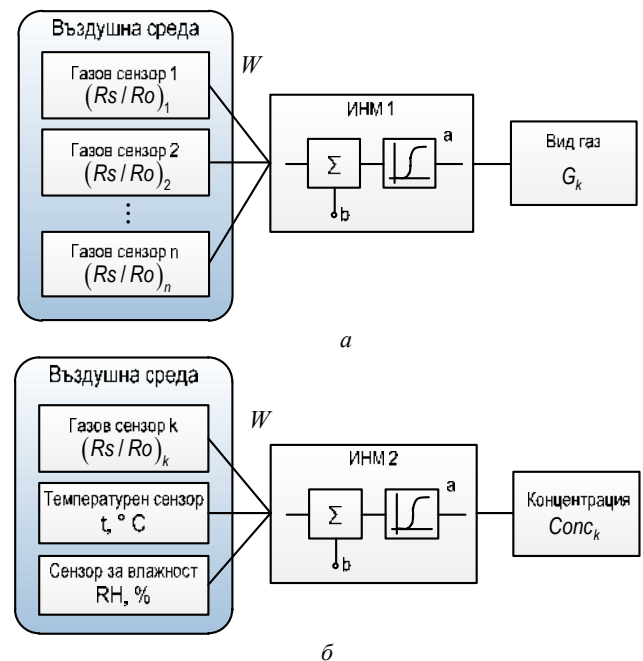
Вследствие на обучението на ИНМ2 се извършва примерна апроксимация на сензорните характеристики със зависимости от типа

$$Conc_k = f[(Rs/Ro)_k, t, RH, W, a, b], \quad (4)$$

където  $W, a$  и  $b$  са параметрите на ИНМ2.

В етапа на реалното измерване и контрол е необходимо освен измерването на параметъра на газовия сензор, отделно да се измерва температурата посредством температурен сензор и влажността на въздушната среда посредством сензор за влажност. По получените стойности посредством обучената невронна мрежа ИНМ2 се определя измерваната газова концентрация.

Обобщена схема на реализация на метода при един газов замърсител е показана на фиг. 1.



Фиг. 1. Обобщена схема на реализация на метода: (а) с ИНМ1 за разпознаване на газа; (б) с ИНМ2 за определяне на концентрацията на разпознатия газ

## РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЯ

Методът е реализиран за разпознаване на газове – метан, изобутан и водород с помощта на газови сензори тип TGS813, TGS2610 TGS2611 [20].

Използвани са характеристиките (2) на сензорите [20], свързващи концентрацията на указаните газове с относителното изменение  $(Rs/Ro)_i$  на съпротивлението на сензора при зададени стойности на температурата и влажността и характеристиките на сензорите (3) при определени концентрации при изменение на температурата и зададени относителни влажности [20].

За сензор TGS813 с  $Ro$  е означено съпротивлението на газовия сензор при базова концентрация 1000ppm и 20°C/65%RH. Съгласно експерименталните зависимости [20], в логаритмичен мащаб характеристиките  $(Rs/Ro)_i = f(Conc_i)$  на сензора при зададени  $t$  и  $RH$  са прави линии и могат да се представят с уравнение от вида

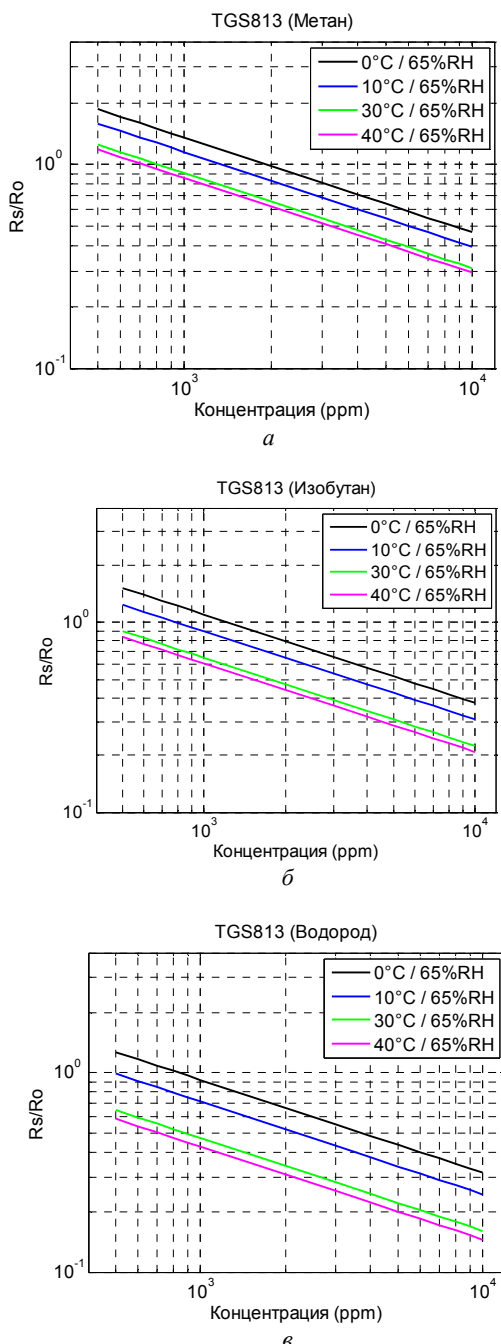
$$y = a_0 + a_1 \cdot x, \quad (5)$$

където  $y=\lg(Rs/Ro)_i$ ,  $x=\lg(Conc_i)$ .

Тези характеристики са успоредни прави, т.е. коефициентът  $a_1$  е постоянен и може да се определи от произволна експериментална зависимост  $(Rs/Ro)_i = f(Conc_i)$  при  $t=const$  и  $RH=const$  [20].

Изменението на температурата и относителната влажност води само до промяна на отместването  $a_0$  на тези характеристики спрямо  $(Rs/Ro)_i$ . Това отместване е изчислено на основата на характеристиките (3) на сензора при 1000ppm при изменение на температурата в диапазона  $-10^{\circ}C \dots +40^{\circ}C$  и относителни влажности в диапазона  $0 \dots 100\%RH$  [20].

По този начин аналитично са получени семейства характеристики  $(Rs/Ro)_i = f(Conc_i)$  при различни температури в диапазона  $-10 \dots +40^{\circ}C$  и фиксирани влажности 0, 20, 40, 65 и 100%RH. На фиг. 2 са представени семейства аналитично получени характеристики  $(Rs/Ro)_i = f(Conc_i)$  за TGS813, показващи влиянието на температурата при 65%RH за различните газове.

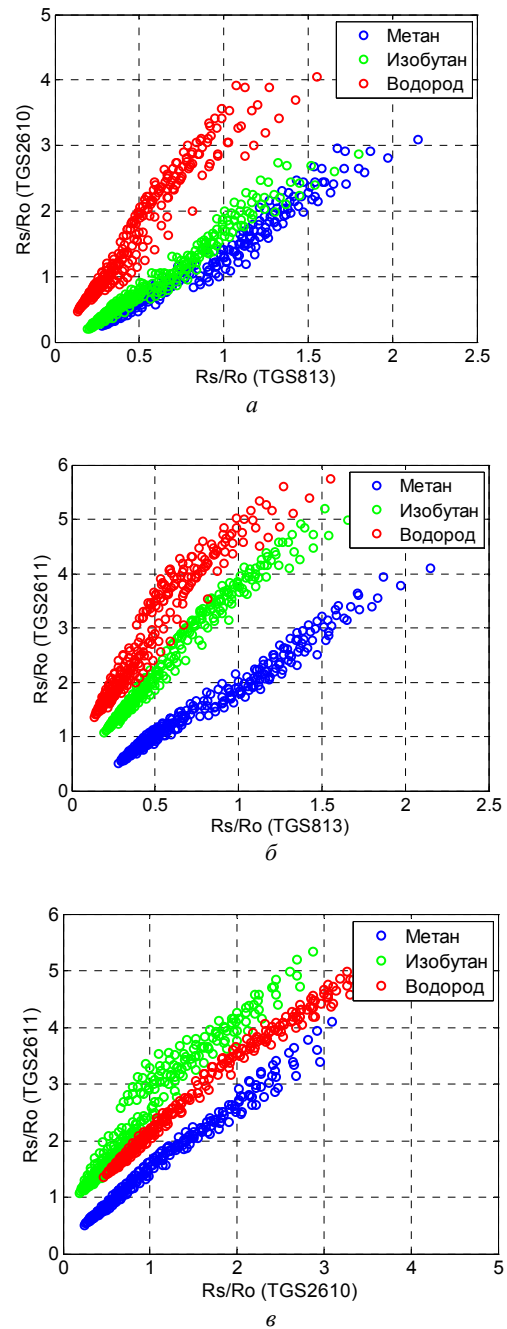


Фиг.2. Аналитично получени характеристики за сензор TGS813 за: (а) метан; (б) изобутан и (в) водород при

изменение на температурата и 65%RH

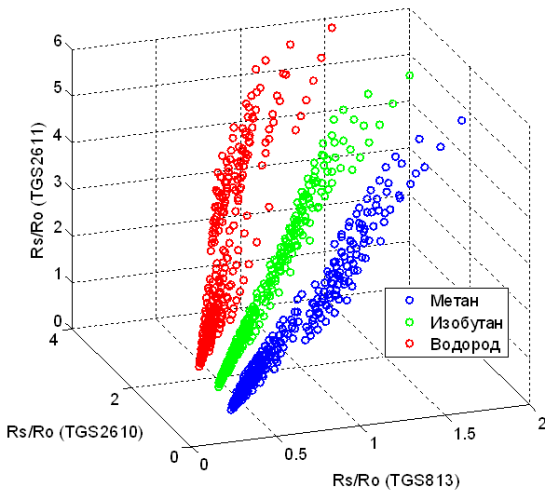
Аналогично на основата на експерименталните характеристики [20] са получени аналитично семейства характеристики  $(Rs/Ro)_i = f(Conc_i)$  и за сензорите TGS2610 и TGS2611 при температури в диапазона  $-10^{\circ}C \dots 40^{\circ}C$  и при фиксирани стойности на относителната влажност 35, 50, 65, и 95%RH. При сензор TGS2610 с  $Ro$  е означено съпротивлението му спрямо изобутан при базова концентрация 1500ppm и  $20^{\circ}C/65\%RH$ , а за TGS2611 - за метан при 5000ppm и  $20^{\circ}C/65\%RH$ .

Характеристиките на всеки един от сензорите поотделно не позволяват да се извърши разпознаването на указаните газове. Затова са получени характеристиките  $(Rs/Ro)_i = f(Rs/Ro)_j$  при  $i \neq j$ , които са показани на фиг. 3.



Фиг.3. Характеристики  $(Rs/Ro)_i = f(Rs/Ro)_j$  при  $i \neq j$  за сензори: (а) TGS813-TGS2610; (б) TGS813-TGS2611 и (в) TGS2610-TGS2611

Получените характеристики показват, че при използване на два сензора и изменение на параметрите на околната среда се извършва частично припокриване на наблюденията за отделните газове. Затова е получена примерна характеристика  $(Rs/Ro)_i = f[(Rs/Ro)_j, (Rs/Ro)_m]$  за трите сензора, показана на фиг. 4.

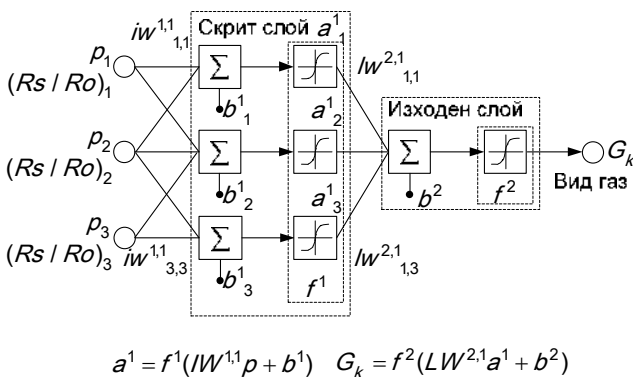


Фиг. 4. Тримерна характеристика  $(Rs/Ro)_i = f[(Rs/Ro)_j, (Rs/Ro)_m]$  за сензори TGS813, TGS2610 и TGS2611

От получената тримерна характеристика може да се направи извода, че в този случай няма припокриване на точките от отделните групи и може да се търси решение за правилно разпознаване на отделните газове при изменение на параметрите на околната среда.

За обучение на ИНМ1 са използвани експериментални и аналитично получени характеристики за разглежданите сензори (при 0°C/%65, 20°C/%20, 40°C/%65), с изключение на базовите характеристики при 20°C/65%RH и граничните характеристики за смущаващите фактори: -10°C/100%RH, 0°C/100%RH и 10°C/40%RH, които са използвани за проверка на достоверността на разпознаването.

Проведени са експерименти с различни алгоритми за обучение на ИНМ1 като най-добра сходимост при най-малък брой неврони се получава при обучение с LM алгоритъм (Levenberg-Marquardt backpropagation). При това получената ИНМ1 с обратно разпространение на грешката (фиг. 5) е с два слоя – скрит и изходен.



Фиг. 5. ИНМ1 за разпознаване на газове

Първият слой е съставен от три неврона – по един за всяка входна величина, а вторият слой е с един неврон.

Зададени са нива и граници за разпознаване както следва: метан – (0.66), граници – (0.34 ÷ 1); изобутан – (0.00), граници – (0.33 ÷ -0.33); водород – (-0.66), граници – (-0.34 ÷ -1).

Достоверността на разпознаване с получената ИНМ1 е проверена на основа на базовите характеристики при 20°C/65%RH и граничните характеристики за смущаващите фактори в общо M=60 точки като резултатите са представени в Табл.1. В отделните колонии е означен броят на наблюденията  $m_{ij}$  от всяка група  $G_i$ , отнесени към група  $G_j$ .

Таблица 1. Достоверност на разпознаване

$m_{ij}$	$G_1$ (метан)	$G_2$ (изобутан)	$G_3$ (водород)
$G_1$ (метан)	60	0	0
$G_2$ (изобутан)	0	60	0
$G_3$ (водород)	0	0	60

Всички наблюдения са разположени диагонално в таблицата, което показва, че измерванията от всички групи са класифицирани правилно.

След класифицирането на вида на газа към група  $G_k$ , трябва да се определи концентрацията му. За целта е проведено обучение на ИНМ2 по характеристиките за сензор TGS2611, указани по-горе. При това се извършва тримерна апроксимация на характеристиките му с цел компенсиране на влиянието на температурата и влажността [24].

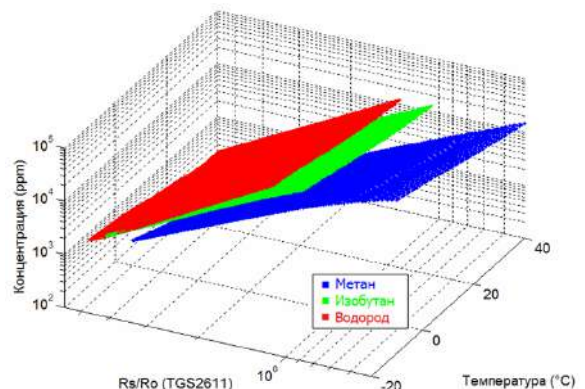
Вследствие на проведеното обучение е получена ИНМ2 с обратно разпространение на грешката с три слоя – два скрити (входен, междинен) и един изходен. Първият слой е съставен от три неврона – по един за всяка входна величина, вторият слой е съставен от седем неврона, а третият слой е с един неврон.

В първия и втория слой предавателната функция на невроните ( $f^1$ ) и ( $f^2$ ) е сигмоидална, а в третия слой ( $f^3$ ) – линейна. Невронната мрежа се описва със зависимостта

$$Y = f^3(LW^{3,2} f^2(LW^{2,1} f^1(IW^{1,1} p + b^1) + b^2) + b^3), \quad (6)$$

където  $Y = Conc$ ,  $p_1 = (Rs/Ro)_i$ ,  $p_2 = t$ ,  $p_3 = RH$ . В случая  $i = 3$ .

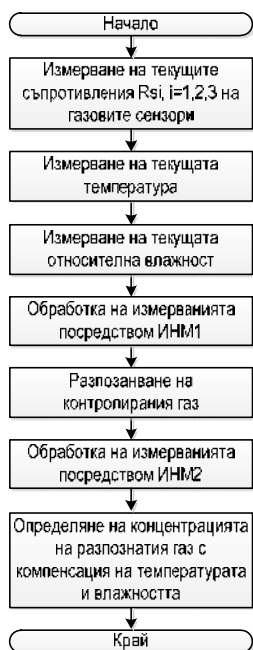
На фиг. 6 са показани резултатите от изхода на обучената ИНМ2 за сензор TGS2611 за метан, изобутан и водород при RH = 50%.



Фиг. 6. Резултати от изхода на обучената ИНМ2 за сензор TGS2611 за метан, изобутан и водород при RH=50%



Алгоритъмът на предлагания метод за разпознаване на газове и измерване на концентрацията им с компенсиране на влиянието на температурата и влажността посредством ИНМ е показан на фиг. 7.



Фиг. 7. Алгоритъм на предлагания метод за разпознаване на газове и измерване на концентрацията им с компенсиране на влиянието на температурата и влажността посредством ИНМ

Посредством обучената ИНМ2 са получени стойности  $Conc_{ИНМ2}$  на концентрацията на отделните газове при различни стойности на отношението на съпротивленията  $(R_s/R_o)_k$ , температурата и влажността. На тях на основа е определена абсолютната грешка

$$\Delta Conc_k = Conc_{k\text{ ИНМ2}} - Conc_k \quad (7)$$

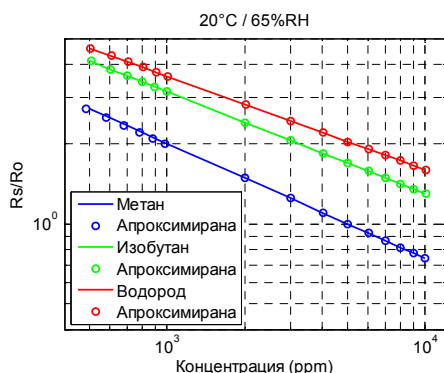
и приведената грешка на предлагания метод

$$\varepsilon_{ном\ k} = \frac{\Delta Conc_k}{Conc_{k\text{ max}} - Conc_{k\text{ min}}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

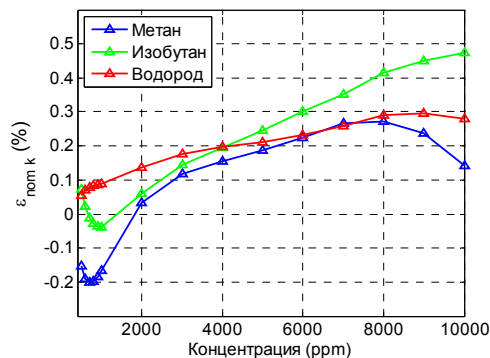
за всеки газ, където  $Conc_{k\text{ ИНМ2}}$  е стойността на концентрацията на газа от група  $G_k$ , определена посредством обучената невронна мрежа ИНМ2;  $Conc_k$  е съответната реална стойност на концентрацията от базовите експериментални характеристики на съответния газ, които не са участвали в обучението;  $Conc_{k\text{ max}} - Conc_{k\text{ min}}$  е диапазонът на изменение на концентрацията му.

Експерименталните базови характеристики при 20°C/65%RH за сензор TGS2611, неучаствали в обучението, и тези, получени с ИНМ2, са показани на фиг. 8.

На фиг. 9 са показани графично приведените грешки при изменение на концентрацията в съответствие със зависимости (8) при използване на предлагания метод с компенсация на основата на ИНМ2.



Фиг. 8. Експериментални базови и получени с ИНМ2 характеристики на сензор TGS2611 за различните газове



Фиг. 9. Приведени грешки при прилагане на метода за измерване на газова концентрация с компенсация на основата на ИНМ2 за сензор TGS2611 при контрол на метан, изобутан и водород

Получените резултати показват, че приведената грешка на предлагания метод на основата на ИНМ за сензор TGS2611 е в диапазона от -0.21% до +0.28% за метан, от -0.04% до +0.48% - за изобутан и +0.5% до +0.29%, което потвърждава ефективността от метода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базата на проведените изследвания могат да се направят следните изводи:

- Разпознаването на метан, изобутан и водород с използването на ИНМ1 се извършва с висока достоверност.
- Определянето на концентрацията на разпознатия газ с помощта на тримерната апроксимация на характеристиките на газовия сензор с обучената невронна мрежа ИНМ2 позволява компенсиране на влиянието на температурата и влажността като приведената грешка за сензор TGS2611 е в диапазона от -0.21% до +0.28% при метан, от -0.04% до +0.48% - при изобутан и от +0.5% до +0.29% - при водород.
- Предлаганият ИНМ-метод за разпознаване на газове и измерване на тяхната концентрация при компенсиране на влиянието на температурата и влажността на околната среда може да се използва и при други газове и типове газови сензори.

## ЛИТЕРАТУРА

- G. F. Fine, L. M. Cavanagh, A. Afonja and R. Binions: Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring, Sensors 2010, 10, pp.5469-5502.
- Fleischer, M., Lehmann, Mirko: Solid State Gas Sensors - Industrial Application, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, 269 p.
- K. Arshak, E. Moore, G.M. Lyons, J. Harris and S. Clifford: A review of gas sensors employed in electronic nose applications, Sensor Review, Vol. 24, Number 2, 2004, pp.181-198.
- Alphus D. Wilson and Manuela Baietto: Applications and Advances in Electronic-Nose Technologies, Sensors, 2009, 9, pp.5099-5148.
- S. Zampolli, I. Elmi, F. Ahmed1, M. Passini, G.C. Cardinali, S. Nicoletti, L. Dori: An electronic nose based on solid state sensor arrays for low-cost indoor air quality monitoring applications, Sensors and Actuators B 101, 2004, pp.39-46.
- Hines E. L., J. W. Gardner, An artificial neural emulator for an odor sensor array, Sensors and Actuators B, 18-19,1994, pp.661-664.
- Wang Ping, Xie Jun. A novel recognition method for electronic nose using artificial neural network and fuzzy

- recognition. *Sensors and Actuators B* 37, 1996, pp.169-174.
- [8] Hyung-Ki Hong, Chul Han Kwon, Seung-Ryeol Kim, Dong Hyun Yun, Kyuchung Lee, Yung Kwon Sung. Portable electronic nose system with gas sensor array and artificial neural network. *Sensors and Actuators B* 66 2000. 49–52.
- [9] Dehan Luo,, H. Gholam Hosseini, John R. Stewart. Application of ANN with extracted parameters from an electronic nose in cigarette brand identification. *Sensors and Actuators B* 99, 2004, pp.253–257.
- [10] Osowski S., T.H. Linh, K. Brudzewski, *Neuro-Fuzzy Network for Flavor Recognition and Classification*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.53, No.3, June, 2004, pp.638-644.
- [11] Bancha Charumporn, Sigeru Omatu, Michifumi Yoshioka, Tom Fujinaka, and Toshihisa Kosaka Fire Detection Systems by Compact Electronic Nose Systems Using Metal Oxide Gas Sensors Neural Networks, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Joint Conference pp. 1317 – 1320.
- [12] Charumporn, B.; Omatu, S. Classifying smokes using an electronic nose and neural networks. SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference on 5-7 Aug. 2002, Vol.5, pp.2661 – 2665.
- [13] Charumporn, B., M.Yoshioka, T.Fujinaka, S.Omatu. Neuro-electronic nose system under temperature and humidity controlled environment. SICE 2003 Annual Conference on 4-6 Aug. 2003. pp. 1051 - 1056.
- [14] Fujinaka, T., M.Yoshioka, S.Omatu, T.Kosaka. Intelligent Electronic Nose Systems for Fire Detection Systems Based on Neural Networks. *Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences*, 2008. ADVCOMP '08. The Second International Conference on Sept. 29, 2008-Oct. 4, 2008. pp.73 - 76.
- [15] Bashyal, S., G.K.Venayagamoorthy, B.Paudel. Embedded neural network for fire classification using an array of gas sensors. *Sensors Applications Symposium*, 2008. SAS 2008. IEEE on 12-14 Feb. 2008, pp. 146 - 148.
- [16] Gao Daqi, Chen Wei. Simultaneous estimation of odor classes and concentrations using an electronic nose with function approximation model ensembles. *Sensors and Actuators B* 120, 2007, pp.584–594
- [17] Marco, S., A.Ortega, A.Pardo, J.Samitier. Gas identification with tin oxide sensor array and self-organizing maps: adaptive correction of sensor drifts, *Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions on Feb 1998. pp. 316 – 321.
- [18] Xiaochuan, He; Wei Shoushui, Wang Ruiqing. Independent Component Analysis and Neural Network Applied on Electronic Nose System, *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 2008. ICBBE 2008. The 2nd International Conference on 16-18 May 2008, pp. 490 – 493.
- [19] Nenov, T., P.Pantelev: Gas sensors for environmental monitoring. *Automatica&Informatics*, 2010, No 1, p.16-19.
- [20] FIGARO Engineering Inc. Products - Gas Sensors ([www.figaro.co.jp/en/product/](http://www.figaro.co.jp/en/product/))
- [21] SYNKERA Technologies Inc. Products ([www.synkera.com](http://www.synkera.com))
- [22] e2v Technologies. Products ([www.e2v.com](http://www.e2v.com))
- [23] Sencera. Products ([www.sencera.com](http://www.sencera.com))
- [24] Nenova, Z., G. Dimchev. Compensation of the impact of temperature and humidity on gas sensors. *XLVI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies - ICEST 2011*, Serbia, Niš, June 29 – July 1, 2011. Proceedings of Papers, Vol.2, p.287-290.