

# ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОЧНОСТТА НА СЕНЗОРИ ЗА ВЪГЛЕРОДЕН ДИОКСИД В СИСТЕМИ ЗА ВЕНТИЛАЦИЯ, УПРАВЛЯВАНИ СПОРЕД ПОТРЕБНОСТИТЕ

МАРИН МАРИНОВ, ТОДОР ДЖАМИЙКОВ, ФОЛКЕР ЦЕРБЕ, ТАШО ТАШЕВ  
E-mail: mbm@tu-sofia.bg, tsd@tu-sofia.bg, volker.zerbe@fh-erfurt.de, ttashev@iit.bas.bg

**Резюме:** При сензорно-базираната вентилация, управлявана според потребностите - Demand Controlled Ventilation (DCV), дебитът на чистия въздух се управлява въз основа на сигнали от сензори, разположени на открито и в съответните помещения. Така се постига по-ефективно управление на концентрацията на замърсителите на въздуха в помещенията при по-ниска консумация на енергия. Сензорите за въглероден диоксид се използват широко в DCV системите и тяхната точност оказва значително влияние както върху консумацията на енергия, така и върху качеството на въздуха в помещенията. В настоящата работа са изследвани подходи за подобряване на точността на интегрални сензори за въглероден диоксид.

**Ключови думи:** енергийна ефективност, сензорно-базирана вентилация, недисперсивни инфрачервени газови сензори,  $CO_2$  сензори.

## 1. УВОД

В Европа повече от 45% от енергията се консумира в сгради. Над 50% от тази консумация е в обществения сектор, където множество обекти са оборудвани със системи за климатизация. Понастоящем сградите се налагат като един от секторите с най-бърз растеж на енергийна консумация, затова тук прилагането на стратегии за пестене на енергия е глобално предизвикателство [1]. Разработени са множество технологии за редуциране на енергийната консумация. Сред най-успешните и най-широко наложилите се е измерването на концентрацията на  $CO_2$  и управлението на вентилационната система въз основа на тези данни, т. нар. вентилация, управлявана според потребностите - Demand Controlled Ventilation (DCV). Вентилацията, управлявана според потребностите, базирана на измерване на  $CO_2$ , на практика представлява комбинация от две технологии: сензори, които измерват концентрацията на въглероден диоксид във въздуха в закритите помещения и система за обработка на въздуха, която използва сензорите за управление на вентилационната система.

Това контрастира с традиционния метод за вентилация, при който се използват твърди нива за въздушния обмен и не се взема под внимание актуалния брой на хората в помещенията [2, 3].

Въпреки големия потенциал за пестене на енергия, DCV все още не се прилага широко в практиката. Като основни проблеми, пречателни за широкото навлизане на DCV, могат да се посочат: недостатъчна точност при измерване на нивата на  $CO_2$ , което често води до свръх вентилация, загуба на енергия и значителните допълнителни разходи, свързани с монтажа, калибрирането и поддръжката на сензорите.

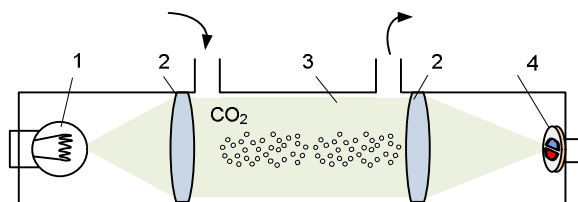
Настоящата работа е посветена на изследване на точността на интегрални недисперсионни инфрачервени сензори (NDIR) за въглероден диоксид. Разгледани са основните източници на грешки при тези сензори и възможностите за намаляването им. Предлага се редуциране на грешките чрез комбиниране на  $CO_2$  сензорите с допълнителни сензорни елементи и съвместна обработка на данните от тях.

## **2. НЕДИСПЕРСИВНИ ИНФРАЧЕРВЕНИ (NDIR) СЕНЗОРИ ЗА ВЪГЛЕРОДЕН ДИОКСИД ВЪВ ВЕНТИЛАЦИОННИТЕ СИТЕМИ**

Във вентилационните системи се използват основно два вида сензори за въглероден диоксид: металоксидни полупроводникови газови сензори и недисперсивни инфрачервени сензори (NDIR). Въпреки че с разработките на полупроводниковите газови сензори дълги години се търсеше алтернатива на скъпите оптични сензори, съвременното развитие в областта на микросензориката позволява масово производство на оптични газови сензори на много достъпни цени. Съвременните NDIR газови сензори предлагат важни предимства като дългосрочна стабилност, висока селективност и точност [4]. Представеното изследване е за този вид сензори.

На *фиг.1* е показана опростена структура на интегрален NDIR газов сензор. Излъчването от широкоспектърен източник (напр. микролампа) (1), преминава през колимираща система (2), измервателната камера (3) и попада върху двуелементен детектор (4), преминавайки съответно през два различни филтъра. Единият филтър покрива цялата абсорбционна ивица на изследвания газ

(измервателен канал), а другият покрива съседна област, в която няма абсорбция (еталонен канал).



Фиг.1 Блокова схема на NDIRсензор за измерване концентрация на  $CO_2$

Fig. 1. Schematic diagram of a NDIR  $CO_2$  sensor

Определянето на концентрацията на въглероден диоксид по оптичен метод се реализира чрез измерване логаритъма на отношението на два лъчисти потока, според закона на Бугер–Ламберт–Беер [5]:

$$(1) \quad \ln \frac{\Phi_{\lambda}}{\Phi_{0\lambda}} = -\alpha_{\rho} Cl = OD$$

където:  $OD$  – оптична плътност (optical density),  $\Phi_{0\lambda}$  – постъпващ монохроматичен поток,  $\Phi_{\lambda}$  – преминал през газа монохроматичен поток,  $\alpha_{\rho}$  – относителен спектрален коефициент на поглъщане на молекулите  $CO_2$ ,  $C$  – концентрация на газа в измерваната проба,  $l$  – оптична дължина на измерваната проба. Стойността на относителния спектрален коефициент на поглъщане  $\alpha_{\rho}$ , заложена в изчисленията, трябва точно да съответства на температурата и налягането, при които се извършват измерванията.

Ако на еталонния канал постъпва оптично  $\Phi_{\lambda 1}$  лъчение, а на измервателния съответно  $\Phi_{\lambda 2}$ , за преминалите (през каналите) лъчения може да се запише:

$$(2) \quad \Phi_{\lambda 1} = \Phi_{0\lambda 1} e^{-\alpha_1 m_1 l}$$

$$(3) \quad \Phi_{\lambda 2} = \Phi_{0\lambda 2} e^{-(\alpha_1 m_1 l + \alpha_{\rho} Cl)}$$

където:  $\alpha_1$  – специфичен коефициент на поглъщане на наличните газове в оптичния канал,  $m_1$  – концентрация на тези газове,  $l$  – оптична дължина,  $\alpha_{\rho}$  – относителен спектрален коефициент на поглъщане на молекулите  $CO_2$ ,  $C$  – концентрация на  $CO_2$  в оптичния канал.

Детекторът (6) преобразува тези лъчения в електрически сигнали:  $V_1(t) = R_{ph} \Phi_{\lambda 1}(t)$  и  $V_2(t) = R_{ph} \Phi_{\lambda 2}(t)$ . След делението и логаритмуването:

$$(4) \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{\Phi_{0\lambda 1} e^{-\alpha_1 m l}}{\Phi_{0\lambda 2} e^{-(\alpha_1 m l + \alpha_p C l)}} \Big| \ln.$$

и при изпълнение на условието  $\Phi_{0\lambda 1} = \Phi_{0\lambda 2}$ , може да се изведе зависимостта за концентрацията на въглеродния диоксид в измервателната камера:

$$(5) \quad C = \frac{\ln(V_1) - \ln(V_2)}{\alpha_p l}.$$

Получената зависимост (5) и реализирането ѝ с оптични и електронни средства, е в основата на съвременните инфрачервени сензори.

### 3. ПРОБЛЕМИ НА ТОЧНОСТТА ПРИ СЕНЗОРИТЕ ЗА ВЪГЛЕРОДЕН ДИОКСИД В DCV СИТЕМИТЕ

Съвременните стандарти в областта на вентилацията и енергийната ефективност поставят високи изисквания към точността на сензорите, използвани в системите за DCV. Така например наложилният се Title 24 standard [6] специфицира строги изисквания по отношение на допустимата грешка на сензорите, която не трябва да надхвърля  $\pm 75$  ppm при концентрации на въглероден диоксид 600 и 1000 ppm, измерени при морското равнище и 25°C. Освен това се изисква тези параметри за точност на сензорите да са гарантирани за период от 5 години, без да е необходимо допълнително калибриране. В актуализирания европейски стандарт EN 13779:2007 са въведени 4 категории за класификация на качеството на въздуха в помещенията, за разграничаването на които е необходимо прецизно диференциално измерване на концентрациите на въглероден диоксид (на открито и в съответните помещенията) [7].

Редица проучвания и анализи на сензорите за въглероден диоксид [8, 9] показват нива за тяхната точност, които не съответстват на изискванията на съвременните стандарти и определено са недостатъчни за изграждане на ефективно управление на вентилационни системи. Освен това, тези проучвания показват, че са необходими значителни подобрения в сензорната технология за постигане на задоволителна точност при интегралните сензори за въглероден диоксид.

В рамките на актуално обхвато изследване [10] е установено, че за нива на  $CO_2$  от 760 ppm, почти 50% от тестваните сензори са с абсолютните грешки над  $\pm 75$  ppm, а при 37% нивата на грешките са над  $\pm 100$  ppm. За концентрации от 1010 ppm, 40% от сензорите имат нива на грешките над  $\pm 75$  ppm, а 30% от

сензорите имат грешки над  $\pm 100$  ppm. По-сериозния проблем е, че значителна част от сензорите са с грешки, надхвърлящи 100 ppm - например за нива  $CO_2$  от 1010 ppm, почти 20% от сензорите са с нива на грешките над 200 ppm.

Системите за DCV, при такива нива на грешките на сензорите, на практика не постигат основната си цел за пестене на енергия при гарантирано качество на въздуха в помещенията.

Всичко това налага по-нататъшни изследвания и работа по подобряване на технологиите за производство. Възможни технически решения са [2]:

- 1) Осъществяване на значителни технологични (хардуерни и софтуерни) подобрения, чрез които да се гарантира повишаване на точността и стабилността на сензорите.
- 2) Предприемане на специални мерки, които да позволяват ефективно калибриране на сензорите на приемливи разходи при монтаж и експлоатация.
- 3) Разширяване на системите с допълнителни сензорни елементи : като сензори за температура, налягане, влажност, позволяващи ефективна динамична корекция на показанията с цел повишаване на точността на  $CO_2$  сензорите;

Настоящата работа е насочена основно към третата алтернатива за подобряване ефективността на системите за DCV. Предлага се подход с използване на интелигентни мултисензорни модули със скалируема архитектура и стандартни интерфейси, даващи възможност за лесно вграждане и интегриране в разнообразни приложения.

#### **4. ОСНОВНИ ИЗТОЧНИЦИ НА ГРЕШКИТЕ НА NDIRСЕНЗОРИ**

Инфрачервените газови сензори генерират сигнал, който е пропорционален на молекулната плътност (брой молекули/обем на газа), независимо, че резултатът от измерването се дава стандартно в ppm. За газовете молекулната плътност е право пропорционална на налягането и обратно пропорционална на температурата.

Следователно промените на налягането и температурата на околната среда (и измервания газ) са два основни източници на грешки. Неизменното наличие на водни пари в околната среда води до промени на съотношението между

компонентите на газовите смеси. Промените на влажността са трети основен източник на грешки при измерването на концентрация на газове с NDIR сензори.

#### 4.1 Изследване на смущаващото въздействие на температура и налягане

Моделът на идеалния газ позволява изследването на влиянието на температурата и налягането с достатъчна точност. От уравнението за състоянието на един мол идеален газ лесно се преминава към общия случай на уравнението за идеален газ с маса  $m$ , чрез зависимостта  $V = \frac{m}{\mu} V_{mol}$ , където  $\mu$  е моларната маса на газа.

Ако е известна плътността на газа при „стандартни условия“ ( $P_{ST}, T_{ST}$ ), формулата за плътността може да се запише като:

$$(6) \quad \rho(P, T) = \rho(P_{ST}, T_{ST}) \cdot \frac{P_M}{P_{ST}} \cdot \frac{T_{ST}}{T_M},$$

където  $P_M$  е измереното налягане, а  $T_M$  - измерената абсолютна температура. При изчисленията се използват стандартно налягане и температура, според Европейската агенция за околната среда и стандарта ISO 13443 – съответно  $P_{ST} = 1013,25 \text{ hPa}$  и  $T_{ST} = 288,15 \text{ K}$  [11].

По този начин, съгласно формулата за плътността, може да се направи относително точна оценка за отклоненията при измерване на концентрацията на  $CO_2$  в случай на промени в температурата и налягането, в сравнение със "стандартните" стойности за температурата и налягането, за които обикновено са калибрирани сензорите.

#### 4.2 Изследване на смущаващото въздействие на влажността

Ако при измерването на концентрацията на  $CO_2$  се приеме, че е налице хомогенна термодинамична система, чрез закона на Далтон може да се отчете влиянието на влажността върху измерените от сензора  $CO_2$  концентрации. Този т.нар. ефект на разреждане с водни пари, води до промяна на отношението между компонентите на газовите смеси, предизвикано от промяната на влажността. За да се получат достатъчно точни данни от измерванията, е необходимо неговото отстраняване. На практика, целта е измерване на концентрацията на сух газ. Но изсушаването на газа, до минимални

концентрации на водните пари в него, е свързано със значително повишаване на сложността и на цената на измервателната система. Затова се търси възможност за определяне на газовите концентрации в суха среда, въз основа на измерване на „мокри“ проби. Връзката между концентрациите на газовете в среда с висока влажност  $C_{Wet_{HIGH}}$  - и среда с ниска влажност  $C_{Wet_{LOW}}$  - се дава със следното уравнение:

$$(7) \quad \left( \frac{C_{Wet_{HIGH}}}{C_{Wet_{LOW}}} \right) = 1 - 0,01(H_{M_{HIGH}} - H_{M_{LOW}}),$$

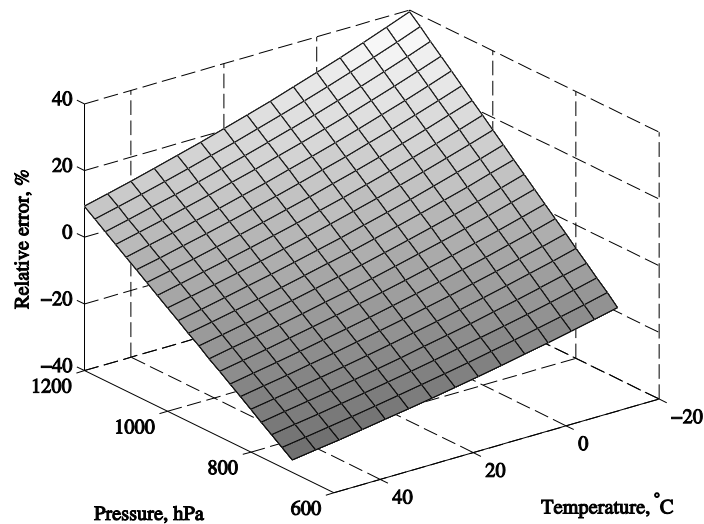
където  $H_{M_{HIGH}}$  - е измерената обемна концентрация на водата в среда с висока влажност, а  $H_{M_{LOW}}$  - съответно в среда с ниска влажност. Така, въз основа на непрекъснатото измерване на относителната влажност, е възможно да се правят динамични корекции за измерваните концентрации на  $CO_2$ . Уравнения (6) и (7) са в основата на предложението за динамична корекция на показанията на инфрачервени сензори за въглероден диоксид, която се различава от предлаганите обикновено регресия и линейна отсечкова апроксимация за различни части от измервателния обхват [4].

## 5. ЛАБОРАТОРНА ПОСТАНОВКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОЧНОСТТА

### 5.1. Теоретична оценка на изменението на налягане и температура върху точността на сензор

Въз основа на формула (6) при „стандартни“ условия  $(P_{ST}, T_{ST})$ , може да се направи теоретична оценка на влиянието на измененията на налягане и температура върху точността на сензор.

Резултатите от направената от нас теоретична оценка са показани на *фиг.2*. По ординатата са нанесени нивата на относителните грешки, а по абцисите са нанесени вариациите на налягането в интервала 700 – 1200 hPa и на температурата в интервала от -20°C до +50°C. Интервалите за вариации на величините са избрани въз основа на годишния ход за климатични области, в които се инсталират вентилационни системи.



Фиг.2. Нива на относителните грешки, при вариация на налягането в интервала 700 - 1200 hPa и на температурата в интервала -20°C до +50°C

Вижда се, че за екстремни комбинации от температура и налягане, могат да се достигнат относителни грешки, надхвърлящи нива от  $\pm 35\%$ . Това са много високи нива и това изисква допълнителни мерки за тяхната редукция.

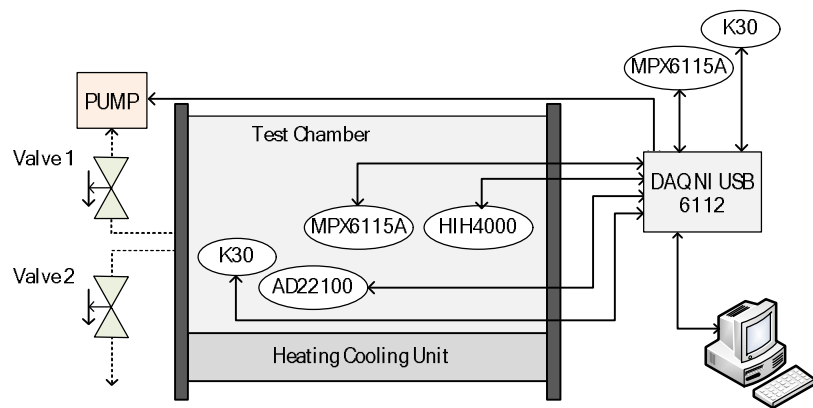
Не трябва да се забравят като източник на грешка и множеството налични дефиниции за „стандартните“ условия, които значително се различават, както регионално, така и в различните научни области и промишлени клонове.

Направените по-горе разглеждания ни водят до разработване на експериментална постановка за конкретно изследване на основните източници на грешки за разглеждания от нас вид сензори.

## 5.2. Опитна постановка

За проверка на теоретичните разглеждания е създадена опитна постановка, *фиг.3*, на базата на системата за събиране на данни NI USB 6212. Управлението на опитната постановка и на измервателните процедури е реализирано в средата за графично програмиране LabVIEW.





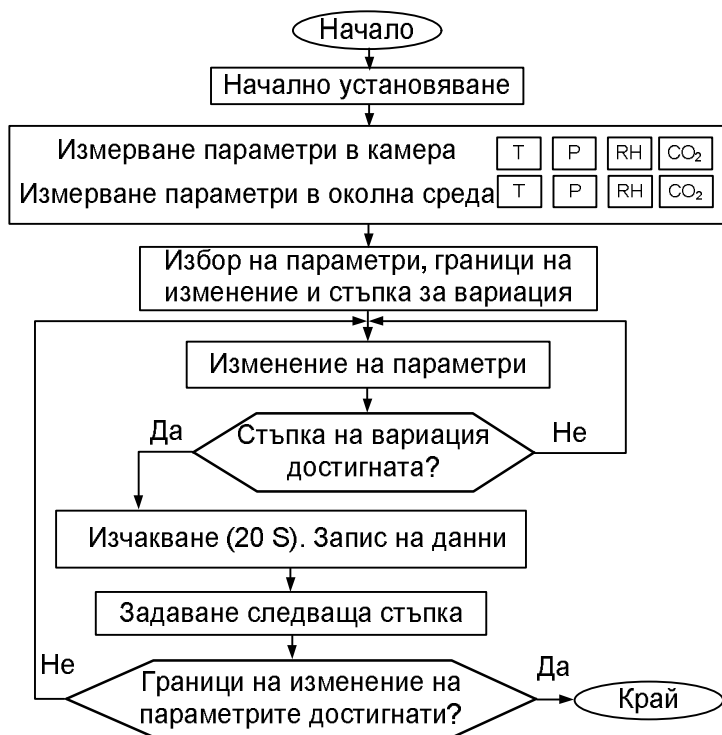
Фиг.3. Блок-схема на опитна постановка за изследване на точността на NDIR  $CO_2$  сензори

В изпитателната камера са монтирани изследваният сензор за въглероден диоксид и сензори за налягане, температура и влажност. Външен нагревател/охладител се използва за поддържане на необходимата температура. За поддържане на налягането в желаните граници, са предвидени изводи за напompване и изпompване на въздух.

Изборът на сензорите в съответните модули се основава преди всичко на съображения за необходими нива на точност, които те трябва да гарантират, така че да е възможна достатъчно добра компенсация на смущаващите въздействия, а оттук и постигане на енергийно ефективно управление. За настоящото изследване е избран широко разпространен и достъпен инфрачервен сензор за въглероден диоксид тип K30 на фирмата. AD22100 е сензор за температура със задоволителна точност и не се нуждае от допълнителни корекции или калибриране. Сензорът за относителна влажност HIH-4000 е кондензаторен чувствителен елемент, с интегрирана на чипа електроника, за обработка на аналоговия сигнал. Сензорът за MPXA6115A е избран за измерване на атмосферно налягане и съответна корекция на показанията на сензора за въглероден диоксид.

### 5.3. Алгоритъм за управление на опитната постановка

Основният алгоритъм за провеждане на измерванията, е показан на *фиг.4*.



Фиг.4. Алгоритъм за управление на опитната постановка за събиране на данни

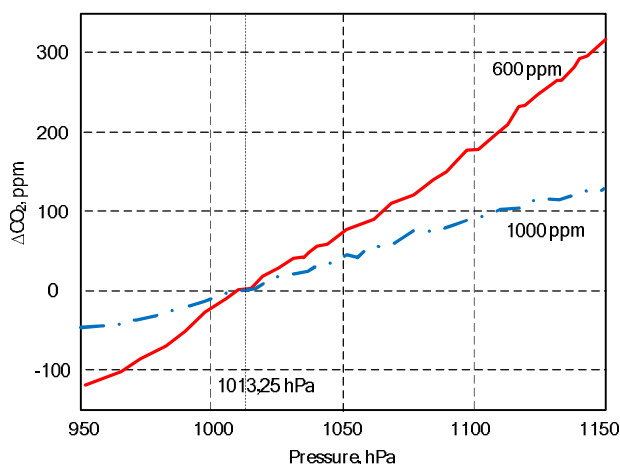
След начално установяване се извършва измерване на основните параметри в камерата и на открито. Избира се параметърът, чието въздействие върху точността ще се изследва, границите за неговото изменение и стъпката, с която то ще се прави. Параметърът се изменя до достигане на стойността, зададена чрез стъпката. Изчаква се определено време, което зависи от динамичните свойства на изследвания NDIR сензор. Избрана е стойност 20 секунди, която гарантира избягване на динамичните грешки при повечето изследвани сензори. Данните от измерването се записват и следва нов цикъл от измервания до достигане на горната граница на изменение на изследвания параметър.

## 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Ефектът от промените на налягането върху показанията на сензорите е изследван чрез изменение на налягането в тестовата камера при концентрации на въглероден диоксид от 600 и 1000 ppm, температура 20°C и относителна влажност 40% (при 1013 hPa налягане). Измерванията са проведени според алгоритъма от *фиг.4* при изменение на налягането в камерата с стъпка от 25 hPa.

Тестовите са осъществени при следната последователност: първоначално налягането в тестовата камера е установено на 950 hPa. След достигане на

зададеното налягане и изчакване за редуция на динамичните грешки от сензора от 20s се записват неговите показания. На *фигура 5* са показани нивата на грешките на измерената концентрация, които се получават вследствие на отклонение на налягането от стандартната стойност 1013.25 hPa, при температура 20°C и относителна влажност 40%:  $\Delta C_{CO_2}(p) = C_{CO_2}^{Measured}(p) - C_{CO_2}(1013,25 \text{ hPa})$ .



Фиг.5. Нива на грешките, предизвикани от изменението на налягането.

Ефектът от промените на температурата върху показанието на сензорите е изследван чрез изменение на температурата в тестовата камера, като концентрацията на въглероден диоксид е поддържана 1000 ppm а налягането - 1013 kPa. Относителната влажност е поддържана на 40% за 20 °C.

Грешките на показанията на сензорите, предизвикани от вариациите на температурата са представени като отклонения на измерваната концентрация при различни температури и стойността за концентрацията при 20°C:

$$\Delta C_{CO_2}(T) = C_{CO_2}^{Measured}(T) - C_{CO_2}(20^\circ C).$$

Сензорният модул К30 показва много добра вградена температурна компенсация и отклоненията на показанията в изследвания температурен обхват от 15 °C до 50 °C не надхвърлят 20 ppm. Проведените изследвания със сензори без температурна компенсация потвърждават теоретично изследваните нива на температурна зависимост достигащи 10 ppm/К.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сензорно-базираната вентилация, управлявана според потребностите, се налага като все по-привлекателна възможност за управление на качеството на въздуха в помещенията, като същевременно позволява значително намаляване на потреблението на енергия и на разходите. В съществуващите системи точността на CO<sub>2</sub> сензорите не винаги е на необходимото ниво, което изисква провеждане на съответни изследвания.

Нашето изследване показва, че вариацията на основни параметри на околната среда води до значителни грешки в показанията на сензорите. Резултатите от представеното изследване потвърждават, че ефектът от изменение на налягането е доминиращ, което се твърди и в други изследвания [10]. Ние предлагаме нивата на грешките да бъдат редуцирани чрез измерване на температура, налягане и влажност с допълнителни сензори и въвеждане на динамична корекция чрез съответни алгоритми.

Получените резултати могат да бъдат използвани в изследвания за адаптивно калибриране на сензори за въглероден диоксид в полеви условия. Това калибриране според нас се явява задължително условие за постигане на висока точност на сензорите за въглероден диоксид, а оттук и за реализация на енергийно ефективни DCV системи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Eurostat, Energy Balance Sheets 2009-2010, Statistical Books, KS-EN-12-001-EN-N, ISSN 183-0 7558, 2012.
2. AIRCUIITY, OptiNet™ Applications. A healthier, more energy efficient approach to demand control ventilation. – White Paper Series, 2006.
3. [Nassif N.. A robust CO2-based demand-controlled ventilation control strategy for multi-zone HVAC systems. – Energy and Buildings, 45, 2012, 72–81.](#)
4. Park, Jong Seon et al. NDIR CO2 gas sensor with improved temperature compensation. – in: Proceedings of EuroSensors XXIV, September 5–8, Linz, Austria, 2010.
5. [Lajunen, L. H. J., P. Peramaki. Spectrochemical Analysis by Atomic Absorption and Emission. Cambridge, UK, The Royal Society of Chemistry, 2004.](#)
6. California Energy Commission. 2013 Building Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings. Sacramento, CA 95814, 2013
7. CEN, EN 13779:2007 Ventilation for non-residential buildings, Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems, 2007.
8. [Won, B. Y. D. The State-of-the-Art in Sensor Technology for Demand-Controlled Ventilation. National Research Council Canada, October 2005.](#)
9. [Fisk, W., D. Sullivan, D. Faulkner. Accuracy of CO2 Sensors Deployed in Commercial Buildings, Report for the California Energy Commission. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, September 2009.](#)

10. Fisk, W., D. Sullivan, D. Faulkner, E. Eliseeva. CO2 monitoring for demand controlled ventilation in commercial buildings. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, [March 17, 2010](#).
11. CEN, EN ISO 13443:2009 Natural gas. Standard reference conditions, Brussels, 2009.

## STUDY OF THE ACCURACY OF SENSORS FOR CARBON DIOXIDE IN DEMAND-CONTROLLED VENTILATION SYSTEMS

MARIN MARINOV, TODOR DJAMIYKOV, VOLKER ZERBE, TASHO TASHEV

E-mail: [mbm@tu-sofia.bg](mailto:mbm@tu-sofia.bg), [tsd@tu-sofia.bg](mailto:tsd@tu-sofia.bg), [volker.zerbe@fh-erfurt.de](mailto:volker.zerbe@fh-erfurt.de), [ttashev@iit.bas.bg](mailto:ttashev@iit.bas.bg)

**Abstract** : With sensor-based Demand Controlled Ventilation (DCV) the ventilation rates are controlled through signals from indoor and outdoor air sensors and so better control of the indoor pollutant concentration and lower energy consumption can be achieved. Sensors for carbon dioxide are widely used in DCV systems and their accuracy can have a significant impact on both energy consumption and the indoor air quality. This work is dedicated to the study of approaches for improving the accuracy of integrated non-dispersive infrared (NDIR) sensors for carbon dioxide.

**Key words** : Demand Controlled Ventilation, *Non-dispersive Infrared (NDIR) Gas Sensors, CO<sub>2</sub> Sensors.*

© Инженерни науки, год. LII, 2015, № 4 pp.27 © Engineering Sciences, LII, 2015, No. 4

ISSN 1312-5702