

Možnosti měření oxidu uhličitého – měřicí přístroje a čidla

Possibilities of Carbon Dioxide Measurement – Measuring Instruments and Sensors

Recenzent
Ing. Petra Štávová, Ph.D.

Príspevek popisuje vlastnosti oxidu uhličitého a možnosti jeho měření. Poskytuje základní přehled dostupné měřicí techniky, podrobněji jsou popsány měřicí principy a typy čidel s ohledem na jejich využití v různých aplikacích.

Klíčová slova: oxid uhličitý, měřicí přístroje, CO₂ čidla, měření CO₂

The contribution describes properties of carbon dioxide and the possibilities of its measurement. It provides a basic overview of the available measuring techniques. The measuring principles and types of sensors are described in more detail, with respect to their use in various applications.

Keywords: carbon dioxide, measuring instruments, CO₂ sensors, CO₂ measurement

ÚVOD

Měření koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší se provádí zejména za účelem řízení kvality vnitřního vzduchu, za účelem zajištění podmínek hygieny a bezpečnosti práce a za účelem řízení technologických parametrů v průmyslových procesech. Kvalita ovzduší v místnostech má významný vliv na pracovní pohodu a udržení pozornosti osob. Vyšší koncentrace CO₂ vedou k předčasné únavě, při delší expozici mohou vést k bolestem hlavy nebo jiným indispozicím [4].

Jedním z možných důvodů měření koncentrace CO₂ v místnostech je získání informace pro efektivní řízení větrání. Zajištění trvale nízké koncentrace CO₂ v místnostech může být, především v chladnějších ročních obdobích, energeticky náročné.

Požadavky na přístroje pro měření koncentrace CO₂ ve vnitřním prostředí nejsou vysoké. Obvykle se měří v místnostech s normálními okolními podmínkami, měřicí rozsahy jsou požadovány do maximálně 5000 ppm (0,5 % obj) a nejsou kladeny ani zvláštní požadavky na přesnost a spolehlivost měření.

Pro zajištění podmínek hygieny a bezpečnosti práce je z hlediska výskytu CO₂ nutné dodržovat zákonné limitní koncentrace na pracovištích, a to zejména na místech, kde se při výrobě používají suroviny, provozní prostředky a postupy, které s sebou nesou riziko vzniku vyšších koncentrací CO₂. Zvláštním oborem bezpečnostního měření se zvýšeným rizikem jsou stísněné prostory, kde může dojít vlivem CO₂ ke vzniku nedýchateľné, životu nebezpečné atmosféry. Jelikož průmyslové aplikace bývají doprovázeny náročnými okolními podmínkami, jako jsou prašnost, vysoké i nízké teploty, vlhkost, působení chemických látek, vibrace, je účelem větrání často ochrana zdraví. Při volbě měřicích přístrojů je nutné posoudit rizika a zvolit odpovídající technickou úroveň měřicí techniky. Požadované měřicí rozsahy v průmyslových aplikacích bývají obvykle nejméně do 5 % obj. CO₂.

Obory procesního měření koncentrace CO₂ mohou být úzce specializované a v požadavcích na měřicí techniku natolik individuální, že přesahují rámec tohoto článku.

CHARAKTERISTIKA CO₂ A JEHO PŮSOBENÍ NA ČLOVĚKA

Oxid uhličitý (CO₂) je bezbarvý plyn, bez zápachu, 1,52 × těžší než vzduch. Vzniká reakcí kyslíku s uhlíkem – oxidací organických látek,

spalováním uhlovodíků, spalováním CO a je produktem látkové výměny většiny organismů.

Za mezní hodnoty z hlediska kvality vnitřního ovzduší se považují koncentrace CO₂ do 1 500 ppm. Koncentrace nad 1000 ppm mohou být individuálně vnímány jako tzv. „těžký vzduch“.

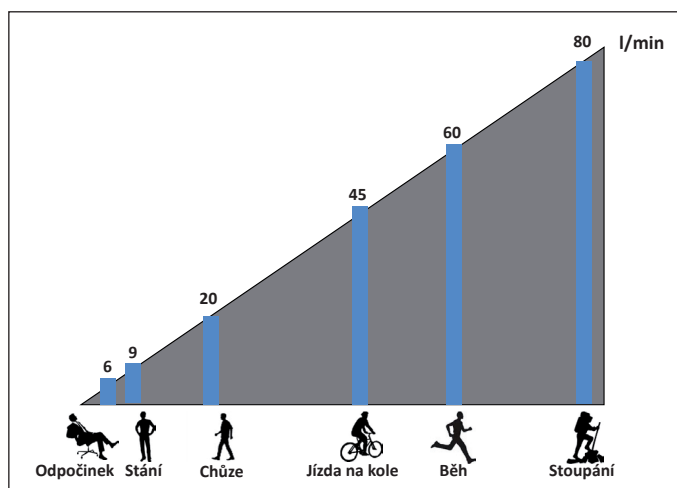
Limitní koncentrace CO₂ na pracovišti z hlediska činnosti lidského organismu stanovuje nařízení vlády č. 361/2007 Sb. Přípustný expoziční limit (PEL), při kterém je povoleno pracovat 8 hodin denně, 5 dní v týdnu, je 9 000 mg/m³ ≈ 5 000 ppm (0,5 % obj.); nejvyšší přípustná koncentrace na pracovišti (NPK-P) je 45 000 mg/m³ ≈ 25 000 ppm (2,5 % obj.) [5].

Vystavení organismu vyšším koncentracím CO₂ se již považuje za zdraví, resp. životu nebezpečné a nelze podle nich navrhnout komfortní větrací zařízení. Snížení koncentrace CO₂ pod hranice hygienických limitů je úkolem pro systémy havarijního větrání.

Vysoké koncentrace CO₂ nad 6 % obj. vedou při delší expozici k silným bolestem hlavy, zvýšení krevního tlaku, hučení v uších a pocitům nevolnosti; při koncentracích nad 10 % obj. CO₂ se mohou dostavit epileptické křeče, svalové poruchy, pokles krevního tlaku a bezvědomí s nebezpečím udušení; koncentrace nad 18 % obj. CO₂ způsobují krátká ochrnutí a poruchy vědomí, které již mohou mít smrtelné následky; 40 % obj. CO₂ má za následek téměř okamžitě bezvědomí a během několika minut smrt [1].

Tab. 1 Vliv oxidu uhličitého na lidský organismus [1], [6], [7]

| Koncentrace CO ₂ | Komentář, symptomy |
|-----------------------------|--|
| < 400 ppm | koncentrace ve venkovním vzduchu |
| < 1 000 ppm | doporučená úroveň CO ₂ ve vnitřním prostředí |
| < 1 500 ppm | maximální doporučená úroveň CO ₂ ve vnitřním prostředí |
| > 1 500 ppm | příznaky únavy, snižování koncentrace, ospalost, letargie |
| < 5 000 ppm | maximální bezpečná koncentrace CO ₂ bez zdravotních rizik |
| > 5 000 ppm | příznaky nevolnosti, bolesti hlavy, zvýšený tep |
| > 10 000 ppm | při dlouhodobém působení prokázány zdravotní problémy |
| > 40 000 ppm | životu a zdraví nebezpečná koncentrace [7] |



Obr. 1 Orientační graf potřeby vzduchu v závislosti na fyzické činnosti

Člověk produkuje CO_2 při dýchání v množství, které je závislé na charakteru fyzické činnosti. Vydechaný vzduch obsahuje cca 4 % obj. CO_2 . Na obr. 1 jsou znázorněny typické fyzické činnosti s uvedením potřeby vzduchu v litrech za minutu.

CO_2 patří mezi tzv. skleníkové plyny. Od nástupu průmyslové revoluce se vlivem působení člověka koncentrace CO_2 ve venkovním ovzduší postupně zvyšuje.

Tab. 2 Zvyšování obsahu CO_2 v atmosféře [1], [8]

| Rok | 1750 | 1800 | 1850 | 1900 | 1925 | 1950 | 1970 | 1990 | 2012 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CO_2 (ppm) | 275 | 280 | 286 | 295 | 304 | 308 | 322 | 354 | 393 |

Celosvětové emise v současné době překračují 30 miliard tun CO_2 . Zvyšování koncentrace CO_2 působením člověka se ze 75 % připisuje spalování fosilních paliv a z 20 % vlivu kácení lesů [1].

PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ KONCENTRACE CO_2

Přístroje pro měření koncentrace CO_2 lze rozdělit podle charakteru jejich použití na:

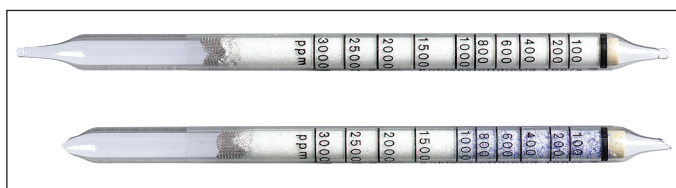
- přenosné,
- stacionární.

Podle způsobu měření je dále možné rozdělení přístrojů na přístroje pro:

- měření okamžité koncentrace,
- kontinuální měření.

Typickým představitelem jednoduchého a spolehlivého zařízení pro měření okamžité koncentrace jsou **detekční trubičky**.

Měření se provádí tak, že se detekční trubičkou pomocí mechanické nebo elektrické pumpy prosaje definovaný objem vzduchu, přičemž dojde vlivem chemické reakce detekční vrstvy trubičky s CO_2 k jejímu



Obr. 2 Detekční trubička pro měření koncentrace CO_2 (před měřením a po měření)

zabarvení. Délka zbarvení detekční vrstvy odpovídá koncentraci CO_2 . Stupnice vyznačená na trubičce udává naměřenou koncentraci.

Zvláštním druhem detekčních trubiček jsou difuzní trubičky, které pracují bez prosávací pumpy a měří průměrnou koncentraci CO_2 za časový úsek několika hodin. Průměrná koncentrace se vypočítá z délky zbarvení stupnice a času, po který se měření provádělo.

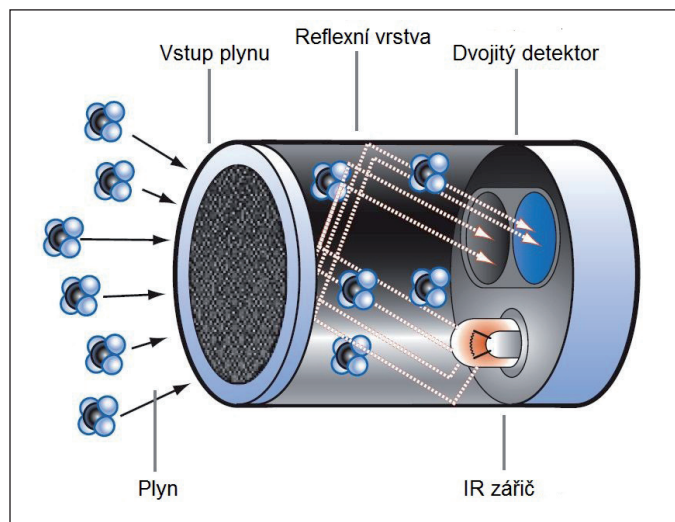
Detekční trubičky byly v minulosti prakticky jediným upotřebitelným zařízením pro terénní měření koncentrace plynů. Postupem vývoje měřicích metod přenosných elektronických přístrojů význam trubiček částečně klesá, nicméně v řadě aplikací zůstávají technicky i ekonomicky nejvhodnější metodou měření. Jednou z výhod detekčních trubiček je, že se dodávají v provedeních pro široké spektrum měřicích rozsahů. Dobrou přesnost měření koncentrace CO_2 zaručují výrobci v tolerancích ± 5 až $\pm 15\%$ po celou dobu použitelnosti, která je obvykle 2 roky od data výroby.

PŘENOSNÉ A STACIONÁRNÍ ELEKTRONICKÉ PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ CO_2

Tyto přístroje pracují obvykle kontinuálně a aktuální měřenou koncentraci obvykle zobrazují v číselné podobě na displeji. Měřený signál předávají ve standardních analogových veličinách nebo komunikačních protokolech do informačních či řídicích systémů klimatizace. Čidla přenosných a stacionárních elektronických přístrojů pracují na třech hlavních principech.

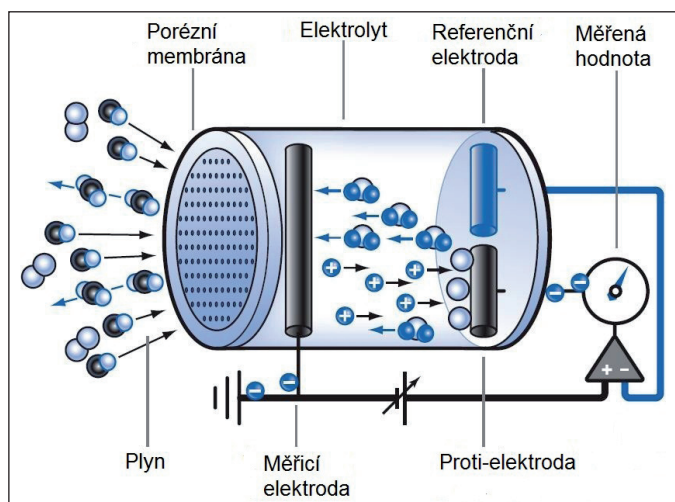
1. Optický IR (infračervený) senzor

Senzor pracuje na základě absorpce části IR spektra v molekulách CO_2 . Měřítkem koncentrace je zeslabení intenzity infračerveného záření určité vlnové délky, které převádí detekční prvek – pyrodetektor na elektrický signál. Tento princip představuje nejlepší výsledky měření, vyznačuje se selektivitou, dlouhodobou stabilitou a dlouhou životností. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena.



Obr. 3 Principiální schéma IR senzoru

Postupem vývoje byly ze senzorů využívajících vlastností IR spektra eliminovány citlivé pohyblivé součásti, tlakové senzory byly nahrazeny pyrodetektory s přesnými filtry a současné kvalitní senzory zpravidla obsahují plnohodnotné kompenzační prvky. Současná pokročilá senzorová technika je z hlediska konstrukce dostatečně robustní a dovoluje nasazení bez zvláštních ohledů i v náročnějších podmínkách.



Obr. 4 Principiální schéma tříelektrodevého elektrochemického senzoru

Jistým limitujícím faktorem měřících vlastností IR senzorů je skutečnost, že vyšší koncentrace CO₂ vedou k tzv. „oslepnutí“ senzoru. Více molekul je schopno pohltit prakticky veškeré IR záření sledovaných vlnových délek, což se projeví na úbytku kvality měřícího signálu v oblasti vyšších měřících rozsahů. Vyšší přesnosti měření (pod ± 5 %) tak paradoxně dosahují IR senzory určené pro nižší měřící rozsahy v řádech tisíců ppm.

Podle požadovaných vlastností měření jsou pro měření koncentrace CO₂ nejlépe využitelné vlnové délky 7,20 μm, 14,99 μm a 4,256 μm [1].

2. Elektrochemický senzor

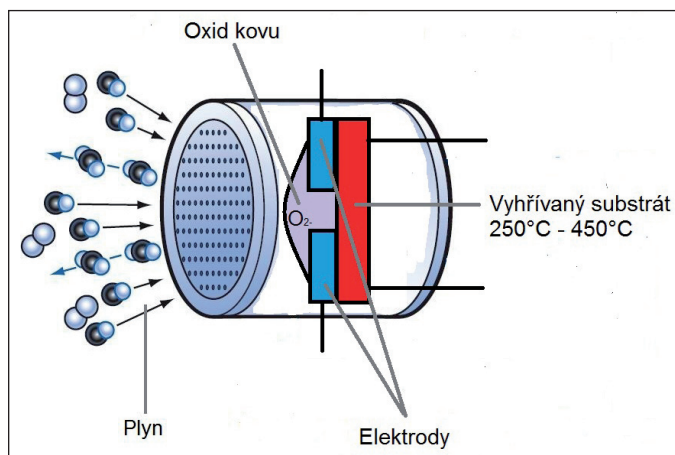
Senzor vytváří měřící signál úměrný koncentraci sledovaného plynu, který vzniká reakcí molekul sledovaného plynu s elektrolytem, uzavřeným v těle senzoru. Materiál elektrod, elektrolyt i napětí mezi elektrodami jsou zvoleny tak, aby na měřicí elektrodě docházelo k elektrochemické reakci doprovázené vznikem volných elektronů. Elektronika měří a zesílí tento velice nízký proudový signál, který odpovídá koncentraci cílového plynu.

Dobré měřící vlastnosti elektrochemického senzoru doprovází v případě CO₂ nevýhoda poměrně krátké životnosti senzoru, která je cca 1 až 2 roky. Rychlejší stárnutí senzorů je způsobeno chemickými změnami vedoucími k postupnému vyčerpání elektrolytu. Pro zachování přesnosti měření je nutné změny citlivosti senzoru kompenzovat novou kalibrací. Zatímco se přesnost měření bezprostředně po kalibraci pohybuje v rozmezí ± 5%, mohou chyby měření již po 1 až 3 měsících přesahovat 20 %. Vzhledem k potřebě častější kalibrace se elektrochemické senzory pro měření CO₂ používají častěji v přenosných přístrojích, ve stacionárních systémech se téměř nepoužívají.

3. Polovodičový senzor

Jedná se o nejlevnější řešení, avšak jeho měřící vlastnosti nejsou použitelné pro určování exaktní koncentrace CO₂. Měření koncentrace je založeno na změně vodivosti polovodiče za přítomnosti cílového plynu. Použitelnými materiály jsou zejména oxidy kovů (např. oxidy zinku, cínu, wolframu, india). Na povrchu tohoto materiálu se vytvoří ve vzduchu rovnovážný stav s molekulami kyslíku, který se za přítomnosti jiného plynu poruší a způsobí změnu vodivosti.

Polovodičové senzory nejsou využitelné v bezpečnostních průmyslových aplikacích. Nízká selektivita, nelineární průběh a časová nestabilita (drift) signálu vymezují jeho použití především pro hlídání nastavených limitů a signalizaci jejich překročení, a to pouze v nízkých měřících rozsazích.



Obr. 5 Principiální schéma jednoduchého polovodičového senzoru

Doménou polovodičových senzorů je, díky jejich výhodné ceně a dlouhodobé životnosti senzorů v čistém prostředí, komerční a domovní technika. V oboru senzorů pro klimatizaci a větrání jsou na trhu řešení, která potlačují některé omezující vlastnosti. Přístroje pracují například tak, že jejich elektronika po každém ukončeném cyklu větrání automaticky posune výchozí hodnotu kalibrace na aktuální měřící signál, který



Obr. 6 Přístroj MSR PolyGuard IAQ pro měření koncentrace CO₂ a VOC pro řízení klimatizace



Obr. 7 Příklady přenosných přístrojů pro měření koncentrace CO₂ (Dräger Pac 7000 s elektrochemickým senzorem a Dräger X-am 5600 s IR senzorem)



Obr. 8 Příklady stacionárních přístrojů pro měření koncentrace CO₂ v budovách (Dräger VarioGard 3300 s IR senzorem, MSR PolyGuard D3 s IR senzorem)

se v daný okamžik považuje za hodnotu odpovídající čistému vzduchu. Takový postup dostatečně spolehlivě a účelně řeší problém driftu senzoru a minimalizuje nároky na údržbu.

Příklady přenosných přístrojů pro měření koncentrace CO₂ jsou uvedeny na obr. 7. Jedná se o přístroje, které jsou kromě zobrazení měřené hodnoty vybaveny varovnými funkcemi při překročení nastavených úrovní koncentrace a mají paměť pro uložení naměřených hodnot.

Na obr. 8 jsou ilustrace příkladů přístrojů pro stacionární použití. Lze je provozovat jako samostatné přístroje se zobrazením měřených hodnot, případně s podobnými funkcemi, jako přenosné přístroje, nebo jako prvky rozsáhlých systémů, které spolupracují s řídicím systémem budovy. Obr. 9 ilustruje příklad stacionárního přístroje pro průmyslové aplikace.



Obr. 9 Příklad stacionárního přístroje pro měření koncentrace CO₂ v průmyslovém provedení (Dräger PIR 7200)

ZÁVĚR

Měření koncentrace plynů neprobíhá přímým způsobem. K vygenerování upotřebitelného měřicího signálu musí senzory využívat a kombinovat více fyzikálních a chemických principů. Tato složitá cesta způsobuje technická omezení měřících rozsahů, rychlostí odezvy, přesnosti a požadavků na provozní podmínky. Volba přístrojů pro měření koncentrace CO₂ by měla vždy vycházet ze zhodnocení charakteru aplikace a účelu použití. Přístroje se liší měřicími vlastnostmi, technickými vlastnostmi, cenou, náročností na údržbu, životností, rozhraním pro reprodukci a přenos měřené hodnoty atd.

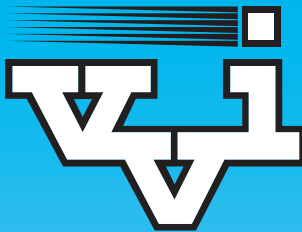
Pokud je účelem občasné měření nebo měření pro kontrolní účely, mohou být vhodnou volbou detekční trubičky. Pro frekventovanější měření a osobní bezpečnostní aplikace lze doporučit přenosné přístroje s IR nebo elektrochemickými senzory. Upřednostňovanou volbou pro stacionární bezpečnostní komerční a průmyslové aplikace by měly být přístroje s IR senzory připojené na měřicí ústřednu. Pro aplikace řízení větrání a klimatizace v budovách je podle nároků na kvalitu měřené hodnoty vhodné volit přístroje s IR senzory nebo ekonomicky výhodnější přístroje s polovodičovými senzory. Podle typu použitého řídicího systému je možné zvolit přístroje s výstupními kontakty nebo spojitým výstupním signálem.

Správný výběr a nasazení techniky pro měření plynů je vždy potřebné doplnit o procesy, které zajistí provozuschopnost a funkčnost přístrojů. Standardním postupem je pravidelná kontrola a kalibrace přístrojů odborným servisním personálem, která by se měla provádět minimálně jedenkrát za rok. Přístroje používané v bezpečnostních aplikacích se navíc obvykle testují v kratších intervalech. Funkční zkouška, tzv. bump-test, spočívá v aplikaci cílového plynu o známém složení na senzor a sledování správné odezvy přístroje, případně celého měřicího systému. Bezpečnostní manažeři v průmyslových podnicích stále častěji vyžadují provedení funkční zkoušky před každým nasazením přístroje. Pro testy a jejich automatickou evidenci dodávají někteří výrobci specializovaná zařízení.

Kontakt na autora: zdenek.vafek@draeger.com

Použité zdroje

- [1] JESSEL, W. *Gase-Dämpfe-Gasmesstechnik*. Lübeck: Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2001. ISBN 3-9808076-0-6.
- [2] *DrägerSensor® & Portable Instruments Handbook*. Lübeck: Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2009.
- [3] DRÄGERWERK AG. *Technické materiály* [online]. 2014. Dostupné z: <http://www.draeger.com>
- [4] MSR ELECTRONIC. *Technické materiály. Basics of gas measuring technique* [online]. 2014. Dostupné z: <http://www.msr-electronic.de>
- [5] Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. ze dne 12. prosince 2007, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci.
- [6] ČSN EN ISO 16000-26. Vnitřní ovzduší – Část 26: Postup odběru vzorků při stanovení oxidu uhličitého (CO₂). 2013.
- [7] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Dostupné z: <http://www.cdc.gov/niosh/idlh>
- [8] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. A summary of current climate change findings and figures. *Wmo.int* [online]. November 2013. Dostupné z: <http://www.wmo.int> ■



VYTÁPĚNÍ VĚTRÁNÍ INSTALACE

**Vážení přátelé,
Společnost pro techniku prostředí nabízí
2. přepracované vydání**

**Názvoslovného výkladového slovníku
z oboru Technika prostředí**

v Č-N-A, A-Č-N, N-Č-A mutacích

Obsahuje terminologii oborů:
Vytápění, Solární technika, Tepelná izolace, Chladicí technika,
Tepelná čerpadla, Větrání, Klimatizace, Hluk a ořesy, Průmyslová
vzduchotechnika, Pneumatická doprava, Čistota ovzduší, Odprašování,
Hygiena, Automatická regulace, Ekonomika investic,
Domovní vodovody, Plynovody, Kanalizace.

Slovník je možno zakoupit:

- ☐ v Univerzitním knihkupectví ČVUT, budova NTK, Technická 6, 160 80 Praha 6 nebo si nechat zaslat dobírkou:
e-mail: vera.mikulkova@ctn.cvut.cz – tel. 224 355 003;
- ☐ osobně v sekretariátu Společnosti pro techniku prostředí:
Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1 nebo
- ☐ v redakci VVI – Fakulta strojní, 8. p., Technická 4, 166 07 Praha 6.

Cena 110 Kč vč DPH