

Ing. Jan ŠIROKÝ, Ph.D.¹⁾
Ing. Jan FABIAN²⁾

¹⁾ Energocentrum Plus, s.r.o.;
ČVUT v Praze, Univerzitní
centrum energeticky
efektivních budov
²⁾ Guavus Solutions Canada ULC

Recenzent
Ing. Miloš Lain, Ph.D.

Modelování spotřeb energií budov

Building Energy Consumption Modeling



Základním předpokladem pro hospodárné provozování budov je funkční monitorování spotřeb a porozumění získaným datům. Vhodná interpretace měřených spotřeb může mnoho prozradit o způsobu provozování budovy, o efektu provedených opatření (zateplení, výměna oken ...), případně může i odhalit chyby v technickém zabezpečení budovy (TZB). V článku je zaměřena pozornost na monitorování spotřeby elektrické energie. Na základě dostupných měření je vytvořen matematický model, který je následně využit k porovnání měřených a předpovědí spotřeb. Jsou porovnány čtyři různé přístupy k modelování spotřeby, konkrétně je diskutováno použití polynomiálních modelů, neuronových sítí, support vector machines (SVM) a autoregresních modelů. Všechny metody byly ověřeny s využitím dat ze dvou rozdílných objektů: obchodního centra a univerzitní budovy.

Klíčová slova: spotřeba elektrické energie, polynomiální modely, neuronové sítě, autoregresní modely

The basic prerequisite for effective operation of buildings is functional monitoring of consumptions and correct understanding of the obtained data. The appropriate interpretation of measured consumptions can reveal a lot about building operation manners, about effect of undertaken measures (insulation, window exchange, ...) and possibly also reveal deficiencies in the heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems. The paper is aimed to the monitoring of electrical energy consumption. Mathematical model was created on the basis of available measurements and consequently used to compare measured and predicted consumptions. Four different approaches towards energy consumption modeling are compared, namely is discussed use of polynomial models, neural networks, support vector machines (SVM) and autoregressive models. All the methods were verified using data from two different premises: shopping center and university building.

Keywords: building energy consumption, polynomial models, neural networks, autoregressive models

ÚVOD

V posledních letech je zvýšená pozornost věnována snižování energetické náročnosti budov. Největšího snížení energetické náročnosti budovy je většinou dosahováno pomocí zateplení budovy, výměny oken, případně dalších konstrukčních opatření. Nemalých úspor lze také dosáhnout pomocí optimalizace způsobu řízení systému vytápění nebo chlazení budovy. Míra dosažených úspor je vždy závislá na obyvatelích budovy a obsluze systému technického zabezpečení budovy (TZB). Obyvatelé mohou svým chováním výrazně přispět k dosahovaným úsporám, ale také mohou vynaloženou investici zhatit nezodpovědným chováním. Často se tak děje z pouhé nevědomosti.

Pro efektivní provozování TZB je klíčová dostupnost srozumitelných indikátorů pro hodnocení aktuální energetické náročnosti budovy. Informace ze systému měření a regulace (MaR) jsou často k dispozici, ale z těchto dat není zjevná odpověď na základní otázky. Provozují budovu hospodárně? Bylo dosaženo slibované úspory? Metody popisované v článku poskytují vhodný nástroj pro věrohodné zodpovězení těchto klíčových otázek. Díky vytvoření matematického modelu je možné porovnávat aktuální spotřebu energií s předpokladem daným modelem. Škála využití této znalosti je velmi široká. V závěru článku jsou prezentovány dva konkrétní praktické scénáře uplatnění matematických modelů pro vyhodnocování energetické náročnosti TZB.

POPIS TESTOVANÝCH METOD

Popisované metody pracují s informacemi ze systému měření a regulace, doplněnými dalšími údaji jako například kalendářními či meteorologickými daty. Všechny testované metody předpovídají hodnotu výstupní veličiny (spotřeba energie) na základě číselného vektoru hodnot vstupních veličin (venkovní teplota, sluneční záření...). Pro tento účel byly použity celkem čtyři typy modelů, jejichž principy jsou popsány v následujících odstavcích (viz také [1]).

Polynomiální modely

Prvním typem modelů jsou modely polynomiální, které mají pro vstupní vektor $x = (x_1, \dots, x_n)$ a výstupní proměnnou y tvar:

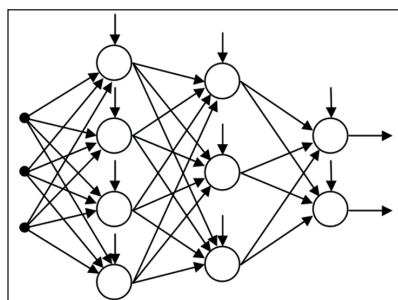
$$y = \sum_{i=1}^n \left(k_i \prod_{j=1}^n x_j^{q_j} \right), \text{ kde } \sum_{j=1}^n q_j \leq d \quad (1)$$

Z hlediska každé proměnné x_j je tedy přenosová funkce modelu polynom stupně nejvýše d , a zároveň v žádném sčítanci této přenosové funkce není součet stupňů všech proměnných x_j větší než d . Učení modelu na určitých datech zde spočívá ve vhodné volbě koeficientů k_i u jednotlivých členů.

Neuronové sítě

Dalším typem modelů jsou neuronové sítě, nelineární modely inspirované biologií [2]. Jejich základem je *neuron*. Vstupem neuronu je několik proměnných, jejichž hodnoty jsou vynásobeny danými vahami, a suma výsledků je vstupní hodnotou pro (typicky nelineární) *aktivační funkci*. Výstupní hodnota této funkce je výstupem neuronu.

Samotný neuron (*perceptron*) má poměrně omezené možnosti, z neuronů je ovšem možné vytvářet sítě (dopředné, případně rekurentní),



Obr. 1 Schematické znázornění neuronové sítě

viz obr. 1. Neuronů jsou pak v těchto sítích uspořádány ve vrstvách, které jsou mezi sebou propojeny „synapsími“. Hodnoty vstupních proměnných jsou napojeny na první vrstvu, výstupem je pak výstup poslední vrstvy.

Kromě dopředných sítí bylo pracováno i s rekur-

zivními sítěmi, kde byl výstup poslední vrstvy přiveden na vstup první vrstvy, ovšem s časovým zpožděním. Předpověď tak probíhala na základě hodnot vstupních proměnných a na základě minulých (predikovaných) hodnot výstupu.

Support vector machines

Support vector machines [3] jsou modely původně navržené pro klasifikaci dvou tříd (tedy pro rozdělení dat na dvě skupiny). Základním principem těchto metod je najít takovou nadrovinu, která daný prostor dat rozdělí na dvě části tak, aby celková vzdálenost této nadroviny od datových vektorů byla co největší.

Aplikace support vector machines pro problémy, kde je hodnotou výstupu reálné číslo, spočívá v řešení úlohy nalezení co nejpřímější nadroviny takové, že všechna data (s výjimkou odlehklých hodnot) se nacházejí co nejblíže této nadrovině v určitém pásu.

Hodnoty vstupních atributů zde představují jednotlivé dimenze prostoru, v němž je výsledná nadrovina hledána, ovšem s tím, že je typicky provedena tzv. „jádrová transformace“, která z původních vstupů vygeneruje prostor o více rozměrech (aby bylo možné řešit i nelineární problémy).

Autoregresní modely

Posledním druhem použitých modelů jsou autoregresní modely typu ARIMAX (k autoregresivním modelům viz například [4]). Základním principem těchto modelů je předpovídání budoucí hodnoty výstupní proměnné na základě minulých hodnot téže proměnné. Zkratka ARIMAX znamená Autoregressive Integrated Moving Average including exogenous covariates. Písmeno X vyjadřuje použití i jiných než výstupní proměnné – tedy hodnota výstupu v tomto případě není předpovídána čistě na základě minulých hodnot výstupu, ale model přihlíží i k hodnotám dalších proměnných.

POROVNÁNÍ TESTOVANÝCH METOD

Všechny popsané metody byly otestovány na praktickém příkladu, který byl zaměřen na modelování tzv. denního čtvrt hodinového maxima. Čtvrt hodinovým maximem se rozumí hodnota průměrného čtvrt hodinového elektrického příkonu, kterou smí odběratel za sledovaný časový úsek nejvýše odebrat. Tato hodnota je stanovena smluvně, dodavatelem je příkon sledován a překročení smluvního limitu je penalizováno. Každý provozovatel se proto snaží smluvní hodnotu nepřekračovat. Věrohodný matematický model, který dokáže předpovědět možné překročení, má proto pro provozovatele budovy zásadní význam.

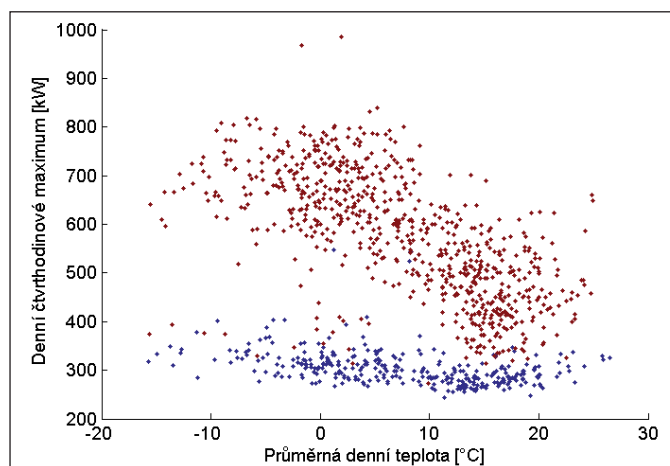
Metody byly testované s využitím reálných dat ze dvou větších objektů. Aby bylo možné predikovat spotřebu v horizontu několika dní, byly jako vstupní data voleny takové proměnné, jejichž hodnotu lze buď jednoznačně určit pro libovolný časový okamžik (např. den v týdnu), případně jejichž hodnotu jsme schopni predikovat (např. předpověď počasí).

Pro účely srovnání metod v tomto článku byla zvolena následující sada atributů:

- venkovní teplota,
- sluneční záření,
- den v týdnu,
- příznak indikující, zda je den pracovní.

Budova ČVUT v Praze Dejvicích

První testovaný objekt je budova ČVUT v Praze Dejvicích. Souhrnný příkon elektrické energie této budovy se pohybuje od 200 kW do 700 kW v závislosti na mnoha faktorech.



Obr. 2 Závislost maximální denní čtvrt hodinové spotřeby budovy ČVUT v Praze Dejvicích na průměrné denní teplotě a pracovním dni (červená)/nepracovním dni (modrá)

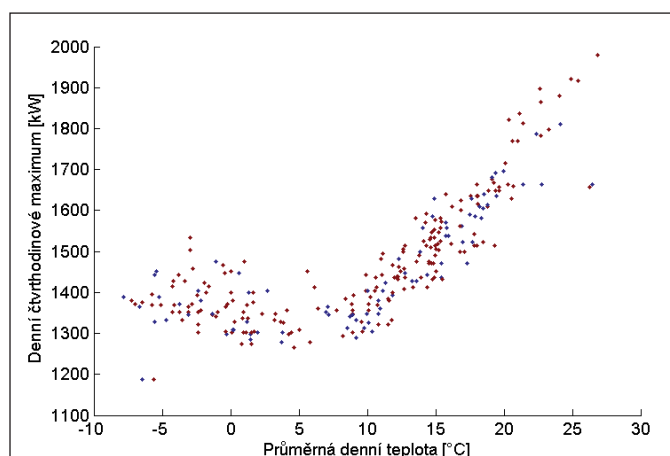
Vedle venkovních podmínek hraje velkou roli charakter provozu v budově daný specifickými podmínkami vysoké školy (energeticky náročné experimenty, nepravidelný provoz laboratoří, zkouškové období, prázdniny...). Vedle výše uvedených proměnných tedy pro tuto budovu sledujeme, zda je právě zkouškové období, období výuky nebo prázdniny. Základní náhled na data je na obr. 2.

Obchodní centrum

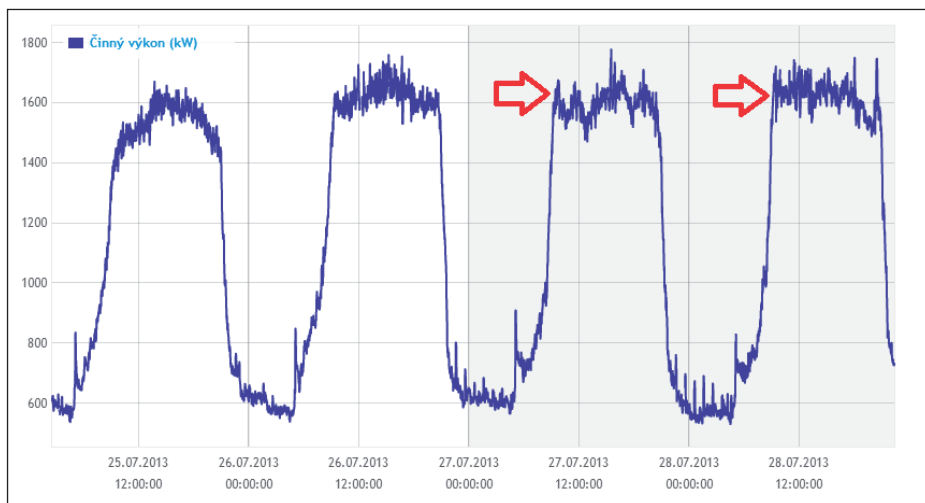
Druhý testovaný objekt je obchodní centrum, kde je měřen příkon centrální vzduchotechnické jednotky. Typický denní průběh je zde velmi stabilní, nevyskytují se zde takové výkyvy jako v případě budovy fakulty. Výrazněji ovlivňuje hodnoty spotřeby především denní teplota, z obrázku je patrné, že rozdíl mezi pracovními a nepracovními dny se zde neprojevuje (viz obr. 3). Pro účely tohoto článku byla tedy zvolena pouze průměrná denní teplota jako vstup všech porovnávaných modelů.

Dosažené výsledky

Tab. 1 ukazuje výsledky testování různých metod predikce spotřeby na uvedených dvou objektech. Modely byly natrénovány na datech za určité časové období, a dále byla provedena predikce hodnot spotřeby na období následující. V případě obchodního centra byly modely trénovány na období leden až červen 2013, predikovány pak byly hodnoty pro červenec a srpen 2013. V případě fakulty byly modely trénovány na období září 2010 až srpen 2012 a testovány na období září 2012 až srpen 2013. Časový interval pro učení modelu je delší než časový



Obr. 3 Závislost maximální denní čtvrt hodinové spotřeby obchodního centra na průměrné denní teplotě a pracovním dni (červená)/nepracovním dni (modrá)



Obr. 4 Modře je označen průběh spotřeb elektřiny, červené šípky označují dopad opatření provedených provozovatelem budovy

příklad je obecný nástroj pro předpovídání spotřeb energií v budovách. Oba příklady využívají polynomiálních modelů.

Tropické vedro a chlazení obchodního centra

V průběhu léta 2013 zasáhla Českou republiku vlna tropických veder. To mělo za následek enormní zvýšení spotřeby energie pro chlazení. Zejména v případě objektů, jako jsou obchodní centra. Na základě analýzy dat vybraného obchodního centra bylo možné provozovatele včas varovat a předpovědět, kdy dojde k očekávanému překročení čtvrtletního maxima. Provozovatel obchodního centra tak mohl s předstihem podniknout preventivní kroky a snížit odběr elektřiny u technologií, které to umožňují. Dne 27. 7. 2014 bylo již v 9.15 hodin téměř dosaženo čtvrtletního maxima, nicméně maximum

interval pro jeho aplikaci, neboť vlivem změn v budově či jejím okolí mohou modely rychle zastarávat, a pro další období by tedy bylo nutné natrénovat nový model.

Chyba uvedená v tabulce je průměrná hodnota střední kvadratické chyby přes všechny dny v testovacím (predikovaném) období.

Tab. 1 Porovnání testovaných metod. Průměrná hodnota RMSE (odmocnina ze střední kvadratické chyby) pro různé metody a data [kW]. Čím nižší je hodnota RMSE, tím lepší je odhad modelu.

	Obchodní centrum	Budova ČVUT
Polynom	35,9	42,6
Dopředná neuronová síť	43,8	39,5
SVM	27,8	63,2
Autoregresní model NARX	41,2	37,5
Autoregresní model ARIMAX	65,0	41,5

Na výsledcích se projevuje odlišný charakter dat z obou budov. Zatímco pro obchodní centrum se podařilo nejmenší chyby dosáhnout s polynomiálními modely a modely typu SVM, pro budovu ČVUT naopak nejlepší výsledky dávají autoregresní modely a neuronové sítě. Zejména v případě budovy ČVUT je pak problém v ovlivnění špiček těžko predikovatelnými faktory jako spuštěním laboratorních přístrojů a podobně.

PRAKTICKÁ APLIKACE PREZENTOVANÝCH METOD

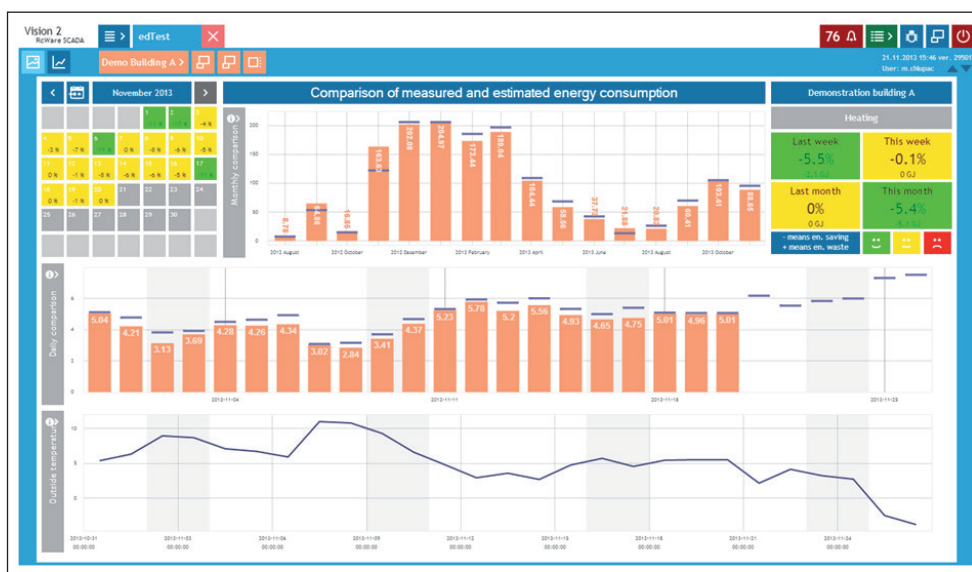
V této kapitole budou prezentovány dvě reálné aplikace popisovaných metod. První je provozní využití předpovídání čtvrtletního maxima v případě obchodního centra. Druhá

nebylo během celého dne překročeno, přestože maximální venkovní teplota dosáhla 32 °C (viz obr. 4). Stejný scénář se opakoval další den, kdy byla maximální venkovní teplota dokonce 35 °C. Při typickém průběhu denní spotřeby, pokud by nedošlo k cílenému zásahu, by přitom během odpoledne byly hodnoty čtvrtletního maxima rozhodně vyšší než v ranních hodinách.

Díky možnosti včasné reakce se provozovatel vyhnul penalizaci za překročení čtvrtletního maxima v řádu statisíců korun.

Energy dashboard

Některé z výše popsaných metod byly implementovány jako volitelné rozšíření do dispečerského systému Mervis SCADA. Toto rozšíření se nazývá Energy dashboard. S využitím Energy dashboardu je možné v reálném čase analyzovat spotřebu monitorovaného objektu (viz obr. 5). Na základě porovnání modelované spotřeby a měřené spotřeby je možné odhalovat nevhodný režim vytápění. Také je možné takto porovnávat aktuální spotřebu a spotřebu modelovanou na základě referenčního modelu. Referenční model může představovat například energetickou náročnost budovy před zateplením. Díky online porovnání je okamžitě dostupná informace o dosaženém úspoře v nákladech na vytápění.



Obr. 5 Porovnání měřené a předpovídané spotřeby energie pomocí Energy dashboardu

ZÁVĚR

V článku jsme se pokusili nastínit budoucnost práce s energetickými daty. Energetická data měřená systémem MaR dnes často slouží pouze ke kontrole fakturace, v lepším případě jsou využita pro porovnání delších úseků (například dvou topných sezón). Díky možnostem dnešní výpočetní techniky je přitom možné z měřených dat v reálném čase vytěžit velmi cenné informace, které jsou využitelné při každodenním provozování budovy. Provozovatel budovy může díky vhodné interpretaci měřených dat bez většího zpoždění identifikovat situace, které by bez jeho zásahu vedly k zvýšeným nákladům na provozování budovy.

Každá budova je unikátní, proto je potřeba individuálně zvážit vstupní atributy i metodu vhodnou pro modelování spotřeby. Pro budovy s jednoduchou závislostí spotřeby energií na vnějších faktorech lze volit jednoduchý polynomiální model, který lze jednoduše implementovat. V případě souběhu více různorodých faktorů je vhodnější použít pokročilejší metody, které umožní lepší postihnouti všech důležitých faktorů při modelování spotřeby.

Kontakt na autora: jan.siroky@energocentrum.cz

Použité zdroje:

- [1] HAI-XIANG, Zhao and MAGOULÉS, Frédéric. A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16.6. 2012, s. 3586-3592.
- [2] NADER S., Moharari, and. DEBS, Atif S. An artificial neural network based short term load forecasting with special tuning for weekends and seasonal changes. In: *Neural Networks to Power Systems 1993. ANNPS'93. Proceedings of the Second International Forum on Applications of IEEE*, 1993.
- [3] DANDAN, Liu, and CHEN, Qijun. Prediction of building lighting energy consumption based on support vector regression. In: *Control Conference (ASCC), 2013 9th Asian. IEEE*, 2013.
- [4] SHYH-JIER, Huang, and SHIH, Kuang-Rong. Short-term load forecasting via ARMA model identification including non-Gaussian process considerations. In: *Power Systems, IEEE Transactions on* 18. 2. 2003. s. 673-679. ■

Náklady na větrnou energii stoupají

Zatímco investiční náklady do tradičních zdrojů energie klesají, náklady do větrné energie rostou. Jak bolestivě zjišťují provozovatelé větrných elektráren, dochází po uplynutí záruční lhůty k dramatickému růstu jejich provozních nákladů a nákladů na údržbu. Aktuální boom větrné energie vede k rostoucím dodacím lhůtám a s růstem velikosti na megawattové rozměry klesá jejich životnost a spolehlivost, což s sebou nese vyšší poptávku po náhradních dílech. Obor proto nutně očekává vypsání preventivních a prediktivních programů údržby.

Pramen: *Newsletter Vogel Process*, 15. 1. 2015

(AB)

Veletrh ISH/Aircontec – co je dnes trend ventilátorů?

S druhým stupněm směrnice pro ekodesign ventilátorů a motorů (VO 327/2011), která vstoupila v platnost 1. 1. 2015, se požadavky na energetickou účinnost dále zvyšují. Závazné hodnoty účinnosti motorů v technických zařízeních budov platí pro: 1) od 1. 1. 2015 třída IE 3 nebo IE2+FM (7,5 až 375 kW) a 2) od 1. 1. 2017 třída IE2 nebo IE2+FM (0,75 až 375 kW), kde FM je frekvenční měnič.

Pro dosažení účinnosti požadované směrnicí pro ekodesign vedou různé cesty. Jednou z nich je zlepšení stupně účinnosti vyšším nasazením nových materiálů v konstrukci motorů. Další cestou je řízení asynchronních motorů třídy IE2 frekvenčním měničem FM. Tímto řešením lze dosáhnout nižší spotřeby el. energie než čistě konstrukční změnou motoru. Třetí cesta vede nasazením EC motorů (EC = electronical commutation) s integrovanou regulační technikou s nižší spotřebou proudu. EC motory se od AC motorů liší konstrukčně a při stejné práci spotřebovávají až o 50 % méně el. energie.

Slabinou ventilátorů při vyšších požadavcích na ochranu před teplem dle EnEV 2014, která vstoupila v platnost v květnu 2014, je tepelná izolace ventilátorů, základních desek a samostatně činných uzavíracích klapek. Možnosti v tomto směru byly uvedeny na veletrhu ISH/Aircontec.

Na rozdíl od dřívějšího prodeje ventilátorů, který byl trhem komponent ventilátorů a vybraného příslušenství, je současným trendem prodej celých systémů ventilátorů včetně rozvaděčů, regulace a bezpečnostních štítků.

Stále více se uvažují celé náklady životního cyklu LCC (LCC = Life-Cycle Cost). Rostoucí náklady na uživatelský komfort a bezpečnost se projevují na výběru ventilátorů včetně přiřazeného regulačního systému.

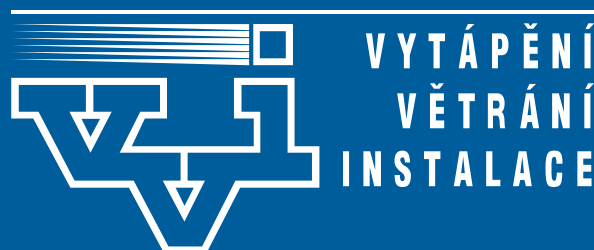
Dalším trendem je např. možnost digitálního vyvolání seznamu náhradních dílů, možnost měření průtoku a zlepšené nasazení ventilátoru.

Ve vývoji nízkých zvukových emisí přicházejí k použití plasty včetně bioplastů. Zlepšená oběžná kola jsou navrhována s podílem bionického tvarování pro nižší spotřebu energie a nižší hlukovou zátěž.

Průmysl větrání vytváří (podle EVIA) roční obrat 7 mld. € a zaměstnává 45 000 osob; z 60 % jej tvoří výroba ventilátorů. Hlavní oblasti nasazení ventilátorů jsou kancelářské budovy, průmysl a energetika, doprava, obytné budovy, supermarkety, školy a nemocnice.

Pramen: *CCI 03/2015*, s. 20-24

(AB)



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 otřesy, 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 dobřírou:
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