

doc. Ing. Dalibor VYTLAČIL, Ph.D.  
 ČVUT v Praze, Fakulta stavební,  
 Katedra inženýrské informatiky

# Simulace změn spotřeby energie v obytných budovách



## Simulation of Energy Consumption Changes in Residential Buildings

Recenzenti:  
 Ing. Martin Barták, Ph.D.  
 doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.

Spotřeba energie v obytných budovách závisí na aktuálním stavu fondu budov. Kromě vnějších podmínek ovlivňují budoucí spotřebu energie dva základní faktory – technické požadavky na nově stavěné budovy a intenzita rekonstrukcí stávajících staveb. Příspěvek prezentuje metodu, která integruje obě strategie do jednoho dynamického modelu. Základními výstupy jsou množství rekonstruovaných budov a spotřeba energie v celém fondu budov. Model dovoluje vyčíslit tyto výsledky podle kvality nově stavěných budov a zároveň lze zadat i strategii pro druhou možnost snižování energetické náročnosti budov, a tou je rekonstrukce stávajícího fondu budov. V případě rekonstrukce jsou klíčovými parametry pro rozhodování vlastníků budov ceny energií a velikost dotace. Snižování cen energií změní finanční výnos z projektu a v návaznosti na to ovlivní rozhodování vlastníka o rekonstrukci budovy. Model vychází ze systémové dynamiky a dovoluje nastavit velké množství okrajových podmínek pro simulace. Dalším výstupem je citlivostní analýza vstupních parametrů, které podstatně ovlivňují rozhodování vlastníků o rekonstrukcích stávajícího fondu budov.

**Klíčová slova:** dynamický model, fond budov, spotřeba energie, strategie

Energy consumption in residential buildings depends on the quality of building stock. Besides external conditions, there are two basic factors influencing future energy consumption – the technical requirements for new-built buildings and the refurbishment rate of the existing building stock. The paper presents an approach which integrates both strategies into one dynamic model. The main outputs are the amount of refurbished buildings and the energy consumption in the whole building stock. The model allows to estimate these results according to the quality of new-built buildings and at the same time it is possible to set up a strategy for the second option reducing the energy demand of buildings, i.e. the refurbishment of existing building stock. In the case of refurbishment, the key parameters for the decision about implementation of proposed improvements in buildings are usually the energy prices and the level of subsidy. Decrease in energy prices will change the financial profit from a project and it will consequently influence the owner decision about the refurbishment of a building. The model is based on system dynamics. It allows for a large scope of boundary conditions to be simulated. A sensitivity analysis has been performed on the input parameters having major influence on the owners' decision about refurbishment of the existing building stock.

**Keywords:** dynamic model, building stock, energy consumption, strategy

## ÚVOD

Obytné budovy tvoří významnou část celkového fondu domů v České republice. Počet (dle posledního sčítání ČSÚ, 2011) obydlených rodinných domů je 1 554 494 s podlahovou plochou  $195 \cdot 10^6 \text{ m}^2$  a 2 416 033 bytů v bytových domech s podlahovou plochou  $156 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ . Podlahové plochy podle druhu bytových prostor jsou uvedeny v literatuře [1] a [2]. Roční spotřeba energie na vytápění v tomto fondu je 59 TWh (hodnota pro rok 2014).

Tab. 1 Vstupní hodnoty

Tab. 1 Input values

Zásoby budov (podlahová plocha)		
Nerealizované projekty	Realizované projekty	Nové budovy celkem
[ $10^6 \text{ m}^2$ ]	[ $10^6 \text{ m}^2$ ]	[ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ ]
246	105	2.1
Doba zastarávání		
Nové standardní budovy	Nové nízkoenergetické budovy	Renovované budovy (realizované projekty)
[rok]	[rok]	[rok]
10	20	15

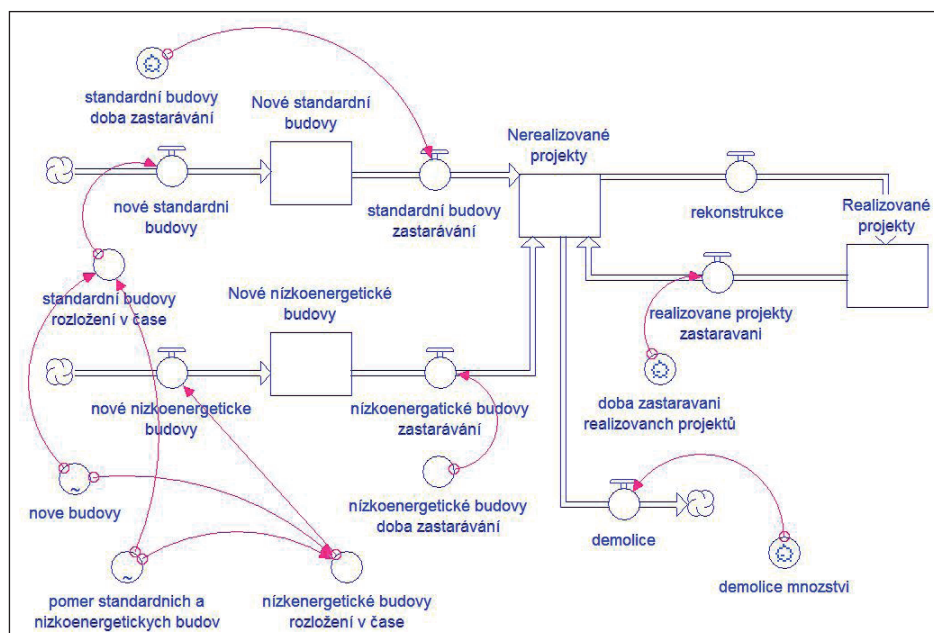
Pro snížení spotřeby existují dvě základní strategie: zlepšení parametrů u nově stavěných budov nebo renovace existujících budov. Možná energetická úspora pro střední úroveň renovace je  $21 \text{ TWh} \cdot \text{rok}^{-1}$  a  $39 \text{ TWh} \cdot \text{rok}^{-1}$  pro rozsáhlou renovaci.

Tento potenciál je možno využít v případě implementace známých technických opatření. V praxi bude úspora nižší z důvodu dalších faktorů, jako je například neproveditelnost projektu z důvodu nízkého ekonomického hodnocení záměru vlastníky, finanční možnosti vlastníků budov (schopnost investora zajistit finanční zdroje), případně technická proveditelnost navržených opatření. Příspěvek se zabývá reálně dosažitelnými úsporami vycházejícími z výše uvedených omezení.

Intenzita renovace je ovlivněna změnami cen energií (např. pokles cen v uplynulých dvou letech), kdy je návratnost investic značně zhoršena nižší výnosností projektů. Dalším faktorem je výše případné dotace, která ovlivní velikost investice a může kompenzovat nižší výnosy projektů z důvodu poklesu cen energií. Vliv výše uvedených faktorů bude zkoumán dále v příspěvku.

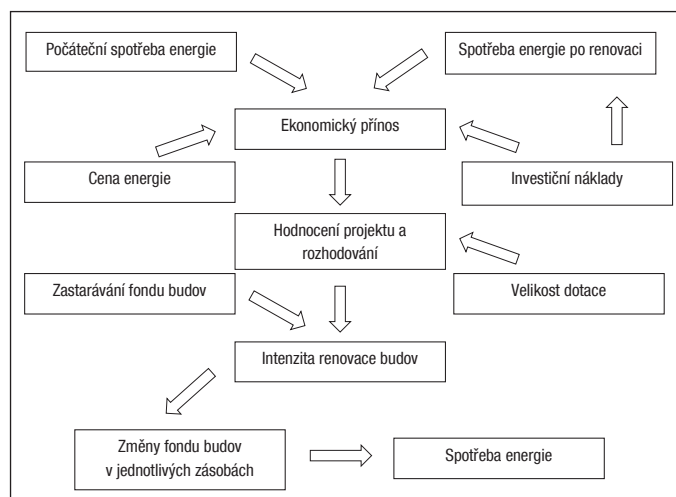
## METODA

Model pro vyčíslení změn parametrů systému je vytvořen na základě systémové dynamiky, viz literatura [3] a [4]. Struktura modelu je tvořena



Obr. 1 Zásoby a toky budov pro popsáný problém

Fig. 1 Building stock and flows for the presented problem



Obr. 2 Postup výpočtu uplatněný v modelu

Fig. 2 Calculation procedure applied in the model

zásobami (v našem případě je to například fond budov různé kvality) a toky ovlivňujícími zásoby ve sledovaném časovém intervalu. Základní podsystém modelu je znázorněn na obr. 1.

## POPIS MODELU A VSTUPNÍCH PARAMETRŮ

Príspevek se zaměřuje na simulaci změn spotřeby energie ve stávajícím fondu budov, který zahrnuje různé skupiny budov lišící se stavem budov svázaným s dobou realizace a tehdy platnými normami. Obr. 1 zahrnuje čtyři prvky zásob lišící se svým stavem. Jsou to prvky *Nerealizované projekty* – existující nevyhovující budovy, dále *Realizované projekty* – budovy po rekonstrukci, *Nové standardní budovy* – nové budovy podle současných norem a *Nové nízkoenergetické budovy* – budovy se spotřebou pod  $50 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ . Nové budovy se přesunou mezi *Nerealizované projekty* po určité době. Doba zastarávání je uvedena v tab. 1. Změny stavů zásob jsou ovlivněny toky, které jsou dány objemem nové výstavby, dobou zastarávání nových i rekonstruovaných budov.

Další podsystémy modelu počítají náklady na vytápění pro původní a zlepšený stav budov. Rozdíl v nákladech a velikost investičních nákladů rozhoduje o ekonomické proveditelnosti projektu. Zde se bude projevovat vliv cen energií i velikost případné dotace. Doba návratnosti rozhoduje o počtu zahájených projektů. Postup výpočtu je znázorněn na obr. 2.

Spotřeba energie pro nerealizované projekty je  $220 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ , pro realizované projekty  $75 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ , nové standardní budovy  $100 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ , nové nízkoenergetické budovy  $40 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ .

V průběhu času dochází ke změně poměru mezi nízkoenergetickými a standardními budovami. Vstupní hodnoty jsou nastaveny tak, aby během pěti let byly v nově stavěných budovách zahrnuty pouze nízkoenergetické budovy.

## VÝSLEDKY SIMULACE

Výsledky simulace pro počáteční stav jsou vidět na obr. 3 až 5. Obr. 3 ukazuje změny v zásobách budov během časového intervalu 10 let. Zde je vidět pokles v parametru *Nerealizované projekty*, a naopak adekvátní nárůst parametru *Realizované projekty* v závislosti na objemu rekonstrukcí. Obr. 4 ukazuje změny toků mezi jednotlivými zásobami. Zde je vidět postupné snížení produkce standardních budov (standardních z pohledu dnešních požadavků) během příštích pěti let. Tyto budovy ale i po ukončení produkce stále plní zásobu *Nerealizované projekty*, protože dochází k postupnému zastarávání, a tudíž zde existuje zpoždění v přesunu mezi nevyhovující stavby. Celková spotřeba a úspory jsou zobrazeny na obr. 5.

Citlivostní analýza byla provedena pro parametry *Rekonstrukce* a *Spotřeba energie*. Parametry jsou vyčísleny pro různé hodnoty cen energií a velikosti dotace. Tyto parametry byly vybrány z důvodu předpokládaného významu ve zkoumaném systému. Zároveň jdou změny parametrů (dopadem na sledované výstupy) proti sobě. Pokles cen energií a tím snížení rentability projektů je kompenzováno zvýšením dotace pro zachování doby návratnosti vložených prostředků.

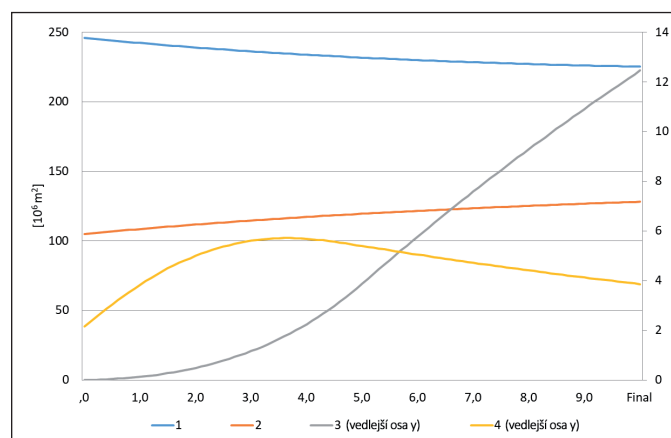
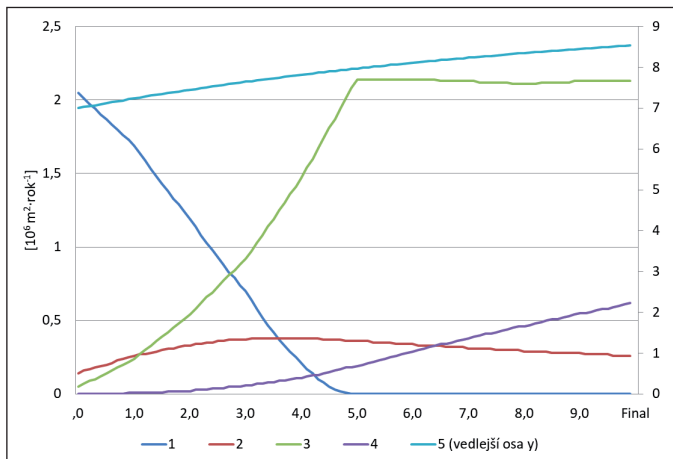
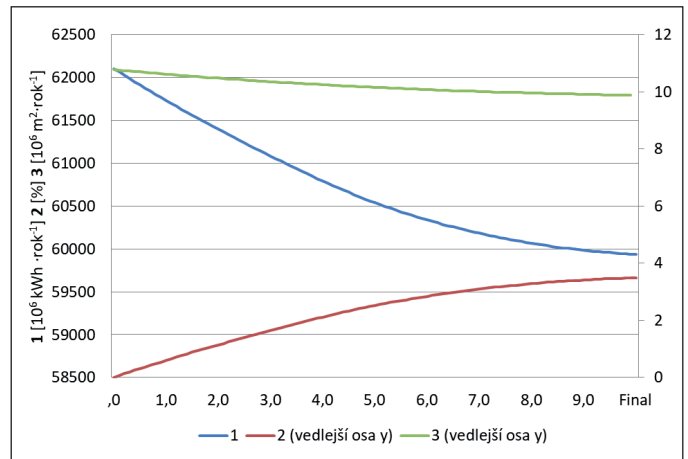

 Obr. 3 Změny stavů budov: 1 – Nerealizované projekty [ $10^6 \text{ m}^2$ ]; 2 – Realizované projekty [ $10^6 \text{ m}^2$ ]; 3 – Nové nízkoenergetické budovy [ $10^6 \text{ m}^2$ ]; 4 – Nové standardní budovy [ $10^6 \text{ m}^2$ ]

 Fig. 3 Changes in building status: 1 – Unrealized projects [ $10^6 \text{ m}^2$ ]; 2 – Realized projects [ $10^6 \text{ m}^2$ ]; 3 – New low-energy buildings [ $10^6 \text{ m}^2$ ]; 4 – New standard buildings [ $10^6 \text{ m}^2$ ]



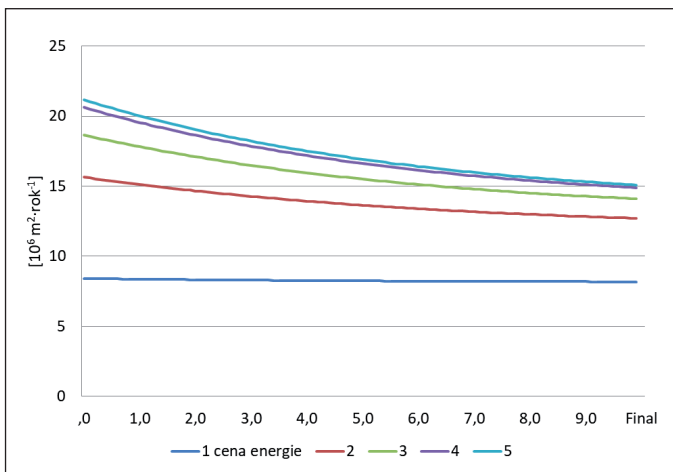
Obr. 4 Změny toků: 1 – Nové standardní budovy [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ ]; 2 – Nové standardní budovy (zastaralé) [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ ]; 3 – Nové nízkoenergetické budovy [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ ]; 4 – Nové nízkoenergetické budovy (zastaralé) [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ ]; 5 – Realizované projekty (zastaralé) [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ ]

Fig. 4 Changes in flows: 1 – New standard buildings [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$ ]; 2 – New standard buildings (obsolete) [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$ ]; 3 – New low-energy buildings [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$ ]; 4 – New low-energy buildings (obsolete) [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$ ]; 5 – Realized projects (obsolete) [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$ ]



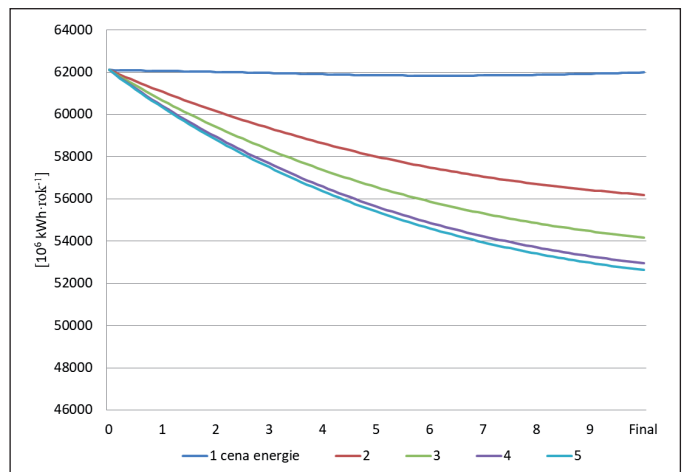
Obr. 5 Spotřeba energie a úspory v porovnání s původním stavem: 1 – Spotřeba energie [ $10^6 \text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$ ]; 2 – Úspory [%]; 3 – Rekonstrukce [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ ]

Fig. 5 Energy consumption and savings compared to the original conditions: 1 – Energy consumption [ $10^6 \text{ kWh} \cdot \text{year}^{-1}$ ]; 2 – Savings [%]; 3 – Reconstruction [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$ ]



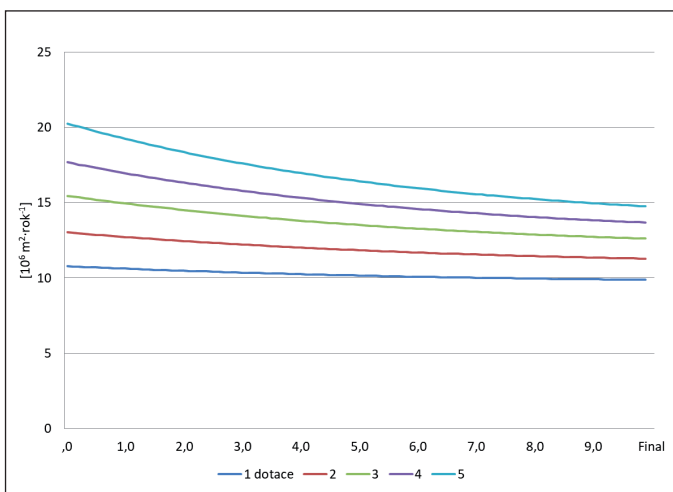
Obr. 6 Rekonstrukce [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ ] – citlivost na změnu cen energií: 1 – 0,80; 2 – 1,35; 3 – 1,90; 4 – 2,45; 5 – 3,00 [CZK·kWh<sup>-1</sup>]

Fig. 6 Reconstruction [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$ ] – sensitivity to change in prices of energies: 1 – 0.80; 2 – 1.35; 3 – 1.90; 4 – 2.45; 5 – 3.00 [CZK·kWh<sup>-1</sup>]



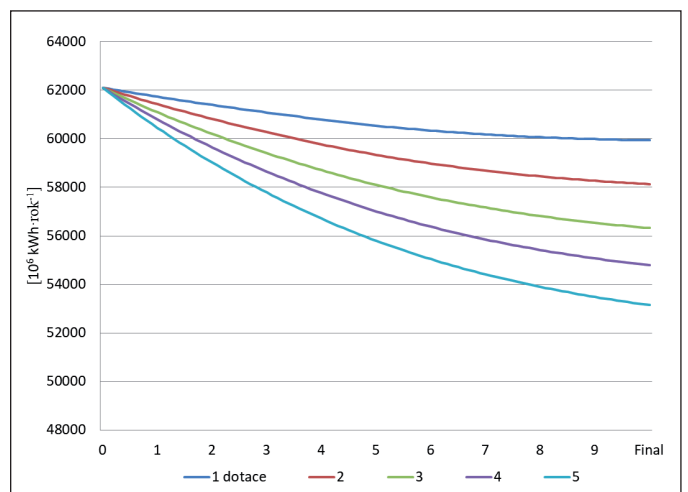
Obr. 7 Spotřeba energie [ $10^6 \text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$ ] – citlivost na změnu cen energií: 1 – 0,80; 2 – 1,35; 3 – 1,90; 4 – 2,45; 5 – 3,00 [CZK·kWh<sup>-1</sup>]

Fig. 7 Energy consumption [ $10^6 \text{ kWh} \cdot \text{year}^{-1}$ ] – sensitivity to change in prices of energies: 1 – 0.80; 2 – 1.35; 3 – 1.90; 4 – 2.45; 5 – 3.00 [CZK·kWh<sup>-1</sup>]



Obr. 8 Rekonstrukce [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ ] – citlivost na změnu dotace: 1 – 0; 2 – 15; 3 – 30; 4 – 45; 5 – 60 [%]

Fig. 8 Reconstruction [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$ ] – sensitivity to change of subsidy: 1 – 0; 2 – 15; 3 – 30; 4 – 45; 5 – 60 [%]



Obr. 9 Spotřeba energie [ $10^6 \text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$ ] – citlivost na změnu dotace: 1 – 0; 2 – 15; 3 – 30; 4 – 45; 5 – 60 [%]

Fig. 9 Energy consumption [ $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$ ] – sensitivity to change of subsidy: 1 – 0; 2 – 15; 3 – 30; 4 – 45; 5 – 60 [%]

Citlivost základních výstupních parametrů (*Rekonstrukce a Spotřeba energie* ve sledovaném fondu budov) na změny v cenách energií i velikosti dotace je značná. Citlivost na změnu cen energií se snižuje s rostoucí cenou, viz obr. 6 a 7, neboť rozhodnutí o zahájení projektu se při ceně nad 3,00 CZK·kWh<sup>-1</sup> podstatně nemění.

## DISKUZE A ZÁVĚR

Byl vytvořen dynamický model pro predikci objemu rekonstrukcí realizovaných ve zvoleném časovém intervalu. Model je zaměřen na obytné budovy, čímž se výrazně odlišuje od dříve vytvořených modelů, které pokrývaly všechny budovy. V sektoru obytných budov byl již poměrně podrobně zmapován fond budov a lze s ním dále pracovat.

Zároveň je zde ale i vysoká míry nejistoty daná nepřesností výstupů z rozhodovacího procesu jednotlivých vlastníků budov, kteří jsou zároveň investory energeticky úsporných opatření. Rozhodování je prováděno na základě nejjednodušších prostých metod, jako je například doba návratnosti vložených prostředků. S tímto parametrem pracuje i prezentovaný model. V jiných sektorech jsou budovy spravovány na profesionálně vyšší úrovni a rozhodování o investicích je prováděno na základě pokročilých metod, jako je například čistá současná hodnota. Ale i použití této metody není snadné zejména z hlediska výběru vstupních parametrů pro diskontování.

Model je nastaven v roce zahájení simulace podle hodnot spotřeby energie uvedené v literatuře [1] a [2]. Je nutno zmínit fakt, že ve skutečnosti se nejedná o součet skutečných spotřeb všech budov, ale o hodnoty stanovené podle množství budov určitého stáří.

Model je vytvořený pro komplexní problém s mnoha vstupy, které se dynamicky mění a zároveň existuje i značná míra nejistoty v hodnotách některých parametrů. Pokud chápeme jeho omezení a předpoklady, za kterých byl navržen, může model sloužit jako nástroj pro testování politik v oblasti úspor energií v budovách.

Kontakt na autora: [vytlcil@fsv.cvut.cz](mailto:vytlcil@fsv.cvut.cz)

Poděkování: Tento výzkum byl realizován v rámci grantu SGS17/122/OHK1/2T/11 *Dynamické modely změn v investicích ve stavebnictví*.

### Použité zdroje:

- [1] HOLUB, P., ANTONÍN, J. *Building Renovation Strategy. Aliance Šance pro budovy*, s. 4–8, 2014.
- [2] ANTONÍN, J. *The Survey of the Building Stock and Possibilities of Energy Savings. Aliance Šance pro budovy*, s. 11–30, 2013.
- [3] STERMAN, J. D. *Business Dynamics – System Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: McGraw-Hill, s. 41–55, 2000.
- [4] MORECROFT, J. *Strategic Modelling and Business Dynamics*. s. 106–111, New York: Wiley, 2008.

### Po 56 MW nyní 40 MW chladu pro Eurotunnel

Po 22 letech od uvedení do provozu se Eurotunnel, spojující francouzské Coquelles a britský Folkestone, dočkal modernizace obřího chladicího zařízení obou trub tunelu. S náklady na modernizaci největšího chladicího zařízení světa ve výši 240 milionů € a nově s výkonem 40 MW proti dřívějším 56 MW dochází zároveň k úspoře energie. Výměna mezitím již zakázaného chladiva freonu R22 s GWP 1810 a s potenciálem poškození ozónové vrstvy ODP 0,055 se uskuteční použitím moderního bezchlorového chladiva R1233zd s GWP < 1 a ODP cca 0. Předpokládána úspora je asi 40 % provozních nákladů.

Pramen: CCI 12/2016, s. 4

(AB)

### Klimatizace s použitím slitin s tvarovou pamětí

Pomocí slitin s tvarovou pamětí bude možno vytvořit klimatizační zařízení, které nepoužívá chladivo a šetří energii. Princip a jeho funkční prototyp je výsledkem společné práce týmu výzkumníků Centra mechatroniky a automatizační techniky Sárské univerzity v Saarbrückenu Dr. Stefana Seeleckeho a Dr. Andrease Schützeho z Rúrské univerzity v Bochumi. Princip využívá superelasticitu a tvarové paměti SMA slitin (SMA – Shape Memory Alloys), konkrétně slitiny niklu a titanu (Nitinol, slitina Ni-Ti s atomovým poměrem cca 50:50), v závislosti na deformaci slitiny.

U prototypu s chladicím obvodem se vede ochlazený vzduch přes rotující svazek drátů z Ni-Ti slitiny, proti němu se vede vzduch, jemuž sděluje teplo a je ohříván. Po dosažení maxima deformace s fázovou přeměnou dráty relaxují, ochlazený vzduch se odvede do místa užití chladu a dráty získají původní tvar a strukturu. Cyklus se opakuje s růstem deformace a ohřevem drátů teplem odebraným ochlazenému vzduchu. Jedním cyklem se vzduch ochladí o 20 až 30 K.

Výzkumníci nyní pracují na ověření dlouhodobé strukturní stability a minimální únavy materiálu, které by umožnily stabilní chladicí výkon po dobu 7 až 10 let. Při modelování funkce chlazení se hledá optimální počet drátů a velikost svazku drátů, rotace a její rychlosti. Stejnou dobu potrvá, než budou vlastnosti ověřeny a budou realizovány první klimatizace.

O významu projektu svědčí, že jej podporuje společnost Deutsche Forschungsgemeinschaft již čtvrtým rokem částkou 500 000 € ročně.

Pramen: CCI 12/2016, s. 4

(AB)

### Budova velvyslanectví USA v Londýně má LEED

Náklady na novou 12podlažní budovu amerického velvyslanectví v Londýně dosahují 1 mld. USD. Budova od Kierana Timberlaka nahrazuje dřívější budovu z roku 1960 od Eero Saarinen. Důvodem jsou především bezpečnostní hlediska.

Budova na Nine Elms získala zlaté ocenění LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) a její design má výrazné environmentální přednosti. Splňuje požadavek města Londýna nemít k roku 2019 „uhlíkovou stopu“. Ve spotřebě energie na osvětlení plní požadavek ASHRAE 90.1. Na vytápění se kromě zemního plynu podílí i spalování biomasy. Sbírá se „šedá voda“ a dešťová voda k použití pro splachování. Plášť budovy je tvořen tenkým filmem se vzduchovými kapsami z transparentního ethylen-tetrafluorethylenového polymeru (ETFE), který obsahuje fotovoltaické články. Tvarovaný plastový plášť je tím na rozdíl od skleněného viditelný pro ptáky, chrání je před nárazem. Střecha budovy skrývá vzduchotechniku a další fotovoltaické panely o ploše 8 300 m<sup>2</sup>, dávající ročně 345 000 kWh.

Dřívější budova na Grosvenor Place bývala populární mj. pro sousedství pomníků amerických prezidentů gen. Dwighta Eisenhowera a Ronalda Reagana, oblíbených v Británii. Nově bude přeměněna na luxusní hotel s 2 000 pokoji.

Pramen: Bloomberg.com 16. 10. 2016

(AB)

### Domy z recyklovaných plastů technikou stavebnice Lego

Téma recyklace je aktuální i v oblasti větrání, chlazení a klimatizace. Kolumbijská firma Conceptos Plástico vyrábí z recyklovaných plastů stavební tvárnice připomínající kameny stavebnice Lego. Ze zbytků kaučuku a plastů se po přidání aditiva, zvyšujícího odolnost vůči požáru, odlévají bloky s předlitým zámek, které se na staveništi skládají do sebe. Výrobce uvádí, že rodinný domek se dá postavit za pouhých 5 dnů. V roce 2015 byly postaveny řadové domky pro 42 rodin s použitím těchto tvárnic vyrobených ze 120 tun recyklovaného plastu. Materiál je o 30 % levnější než nejlacinější stavební hmoty, má dlouhou životnost a v Kolumbii oceňovanou odolnost proti zemětřesení. Předností je i snadná demontáž. Vedle státních projektů pro chudé jej využívají i nevládní organizace pro nouzové stavby a školy v odlehlých regionech.

Pramen: CCI 11/2016, s. 4

(AB)