

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

Model predikce spotřeby energie ve městech

Model for Prediction of the Energy Consumption in Cities

Recenzenti:
 doc. Dr. Ing. Michal Jaroš
 Ing. Josef Plášek, Ph.D.

Množství lidí žijících ve velkých městech stále narůstá. Počet obyvatel i jejich chování mají podstatný vliv na spotřebu energie. Cílem uvedené práce je vytvořit dynamický model pro predikci vývoje spotřeby energie ve městech. Především to znamená identifikovat hnací síly změn a příčinné souvislosti a následně vytvořit odpovídající model. Nejvýznamnější část spotřeby je svázána s bydlením. Jedná se o energii potřebnou pro zajištění požadovaných parametrů vnitřního prostředí budov, další je energie spotřebovaná v dopravě, službách města, výrobcích a službách pro obyvatele. Všechny tyto složky jsou v modelu zahrnuty, přičemž největší pozornost je věnována budovám. Řešení využívá metodiku systémové dynamiky. Model lze využít pro jakékoli město, příkladem je predikce zpracovaná pro Prahu.

Klíčová slova: velká města, spotřeba energie, dynamický model, simulace

The number of inhabitants in big cities increased in the past very quickly. This number and behavior of inhabitants influence the consumption of the energy that is consumed in the area of these cities. The goal was to develop dynamic model which will describe the changes of key parameters of the system. It means to identify principal driving forces and to find the connections with model elements. Main parts of the consumption are covered by these sub models: the energy consumed for housing, services and products for inhabitants, city services and transport. Special attention is given to the description of the energy consumptions in the residential houses and in the buildings providing city service. The model includes also the refurbishment of the existing building stock. The simulation was performed for Prague city. The important sub-system is also the migration of people from rural area and small cities to big cities.

Keywords: big cities, energy consumption, dynamic model, simulation

ÚVOD

Příspěvek se zabývá predikcí spotřeby energie ve městech, zejména v těch velkých, neboť přibližně dvě třetiny energie jsou spotřebovávány právě zde. Ekonomická nerovnováha mezi venkovem a městy, která ovlivňuje rozdílné pracovní možnosti a výši příjmů, vyvolává migraci obyvatel do velkých měst a do budoucna tak lze očekávat nárůst uvedeného podílu. Kromě zvyšování počtu obyvatel působí na spotřebu energie další vlivy: urbanistické uspořádání města, hustota obyvatel, kulturní zvyky, demografické změny a věková struktura, viz [1], a dále také kvalita staveb, a to jak rezidenčních, tak i budov ve vlastnictví místních vlád. Kvalitativní zlepšování fondu budov významně ovlivňuje budoucí spotřebu energie.

Samostatnou kapitolou je spotřeba energie vyvolaná ekonomickou aktivitou na území měst. V modelu je zahrnuta energie svázaná s dodávkou služeb, ale není zahrnuta energie spotřebovaná v průmyslu, která vyžaduje zcela odlišný model.

Z výše uvedeného popisu je vidět, že počátečním a významným problémem je otázka, co vlastně parametr „spotřeba energie ve městě“ zahrnuje. Je nutno nejdříve definovat, z kterých složek bude výsledný parametr vypočítán. Možný pohled, který lze uplatnit, je například environmentální. Tento často používaný přístup zahrnuje energii použitou při dodávce služeb, ale i energii zabudovanou do produktů, které byly spotřebovány na území města. Při tomto přístupu je však zřejmé, že výslednou hodnotu pro jednotlivé druhy energie nelze použít například pro dimenzování kapacit zdrojů a sítí, neboť část energie je „vydána“ mimo území města.

Cílem navrženého modelu je pokrýt ty složky, které podstatně ovlivňují dynamiku systému. Jsou to především změny v kvalitě a objemu fondů staveb (rezidenčních i vlastněných různými subjekty) a popis změn počtu obyvatel. Místo slova fond je možno v modelu použít i termín zásoba vycházející z použité metody.

POUŽITÉ METODY

Dynamický model je navržen jako model využívající systémovou dynamiku. Základní popis je možno nalézt v literatuře [2] a další příklady použití jsou uvedeny v [3]. Systémová dynamika dovoluje integrovat do modelu různé pohledy, například technickou a ekonomickou stránku problému, čímž umožňuje zpracování komplexních problémů, pro které by se obtížně hledala jiná metodika. Po identifikaci klíčových prvků – zásob, toků a pomocných prvků – konvertorů jsou do modelu vloženy vazby, které vytvoří kompletní strukturu.

POPIS MODELU

Navržený model zahrnuje tyto složky spotřeby energie:

- Spotřeba energie 1 – Rezidenční sektor – energie spotřebovaná v bytových domech odvozená od podlahové plochy.
- Spotřeba energie 2 – Služby a produkty – energie zabudovaná v produktech a službách spotřebovaných obyvateli.
- Spotřeba energie 3 – Doprava – energie spotřebovaná v dopravě. Závisí na množství obyvatel, ale částečně i na hustotě osídlení (nižší hustota znamená částečný nárůst spotřeby), [4].
- Spotřeba energie 4 – Služby města – energie za služby poskytované městem (místní vládou), např. osvětlení ulic, energie spotřebovaná ve školách, vládních budovách, nemocnicích [5]. Závisí na počtu obyvatel a ploše města.

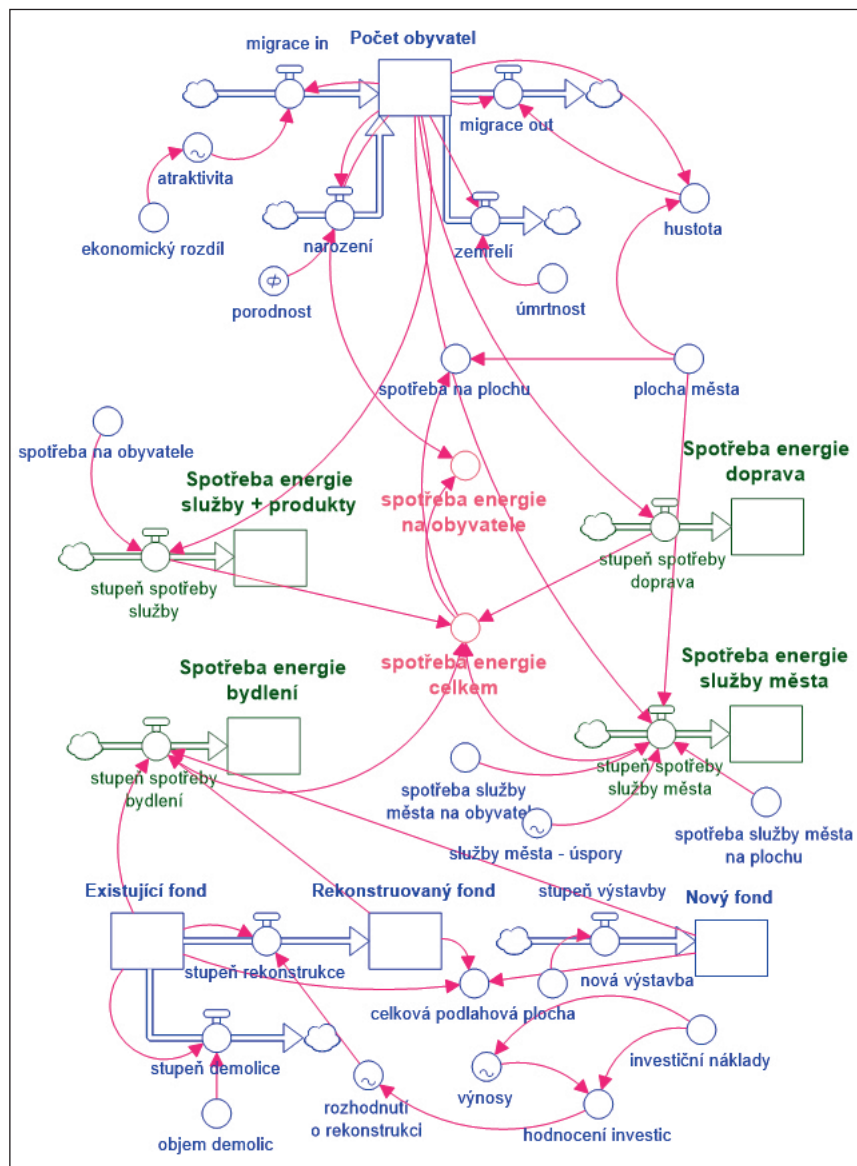
Celý model zahrnující uvedené složky je zobrazen na obr. 1.

Významný podsystém je zaměřen na stanovení počtu obyvatel. Prvek *Počet obyvatel* je ovlivněn jak migrací do města, tak zároveň i odchodem obyvatel z města. Zahrnuje i počty nově narozených a zemřelých obyvatel [6]. Dominantní vliv má příchod nových obyvatel, který je ovlivněn parametrem atraktivity závislejícím na ekonomickém rozdílu mezi velkým městem a menšími sídly.

Tab. 1 Vstupní hodnoty – fondy (zásoby budov)

Tab. 1 Input values — funds (building stock)

| | Podlahová plocha [10 ³ -m ²] | Spotřeba energie [kWh-m ² -rok ⁻¹] |
|-----------------------|---|---|
| Existující fond budov | 27 884 | 280 |
| Rekonstruovaný fond | 8 329 | 130 |
| Nový fond | 6 000 | 50 |



Obr. 1 Model zahrnující všechny uvažované složky spotřeby energie

Fig. 1 Model covering all energy consumption components under consideration

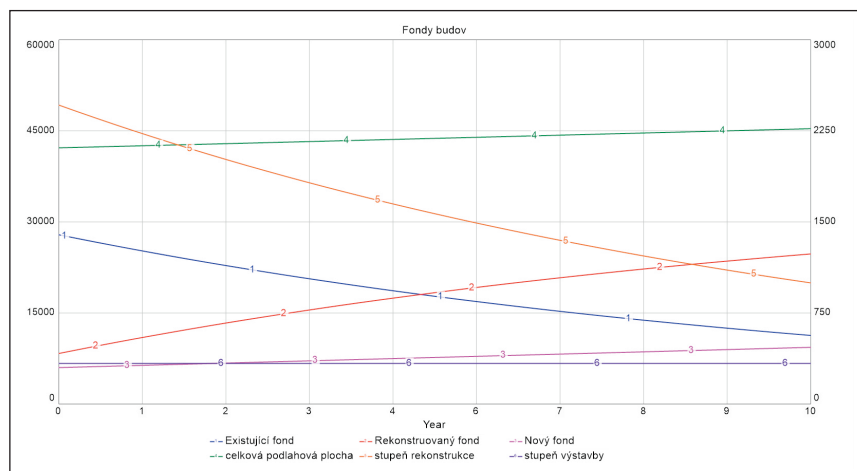

 Obr. 2 Stav fondů budov [10³-m²] a jednotlivé stupně změn ve fondech budov [10³-m²-rok⁻¹] – pravá osa

 Fig. 2 Status of building stocks [10³-m²] and individual rates of change in the building stocks [10³-m²-year⁻¹] – right axis

Dostupná data pro simulaci byla získána pro rok 2017, kdy počet obyvatel byl 1 295 000 a příchod nových obyvatel 36 923. Počet obyvatel, kteří se odstěhovali, byl 25 529.

Dalším významným podsystémem je fond budov a zahrnutí změn, které lze očekávat. Lze očekávat významný vliv z důvodu změn jak v počtu existujících budov, tak i v kvalitativních parametrech. Jednotkou pro modelování fondů (zásob) budov je podlahová plocha a měrná spotřeba energie [7]. Zásoba *Existující fond* zahrnuje budovy postavené do roku 2017, *Rekonstruovaný fond* je 27 % z celkového fondu budov. *Nový fond*, tj. nově stavěné budovy, je predikce pro budoucí roky. Tento parametr zahrnuje samozřejmě značnou nejistotu. Uživatel modelu může parametr nastavit podle aktuální situace. Hodnota uvedená v tab. 1 odpovídá výstavbě v roce 2017 a byla konstantní pro celou dobu simulace.

Stupeň rekonstrukce budov závisí u rezidenčních staveb na rozhodnutí vlastníka, a proto model zahrnuje prvek rozhodnutí o rekonstrukci stanovený na základě investičních nákladů a budoucích výnosů daných úsporou provozních nákladů. Úspory energie jsou uvažovány i v budovách zajišťujících služby města. Tento parametr závisí na rozpočtu města a také na závazcích ve vztahu ke snížení produkce skleníkových plynů. Zde bylo uvažováno s rekonstrukcí 40 % budov do deseti let. S ohledem na stále rostoucí požadavky na snižování spotřeby energie lze očekávat vyšší tempo úspor.

Součtem všech čtyř základních složek je určen parametr *spotřeba energie celkem* a *spotřeba energie na obyvatele*, další významný parametr, který je sledován při porovnání měst. Výsledky odpovídají vybraným složkám spotřeby a je potřeba rozumět, co je vlastně výstupem ze simulace.

VÝSLEDKY

Simulace byla provedena pro časový interval 10 let. Na obr. 2 jsou zobrazeny výsledky pro změny zásob budov. Zásoba *Existující fond* (budovy, které nebyly dosud rekonstruovány) byla snížena o 59 % během tohoto časového intervalu. Naopak vzrostla zásoba rekonstruovaných budov. Parametr *stupeň rekonstrukce* klesá z důvodu menšího počtu nezrekonstruovaných staveb. Parametr se může měnit při zavedení různých forem podpory, a nemusí tedy mít jen klesající tendenci.

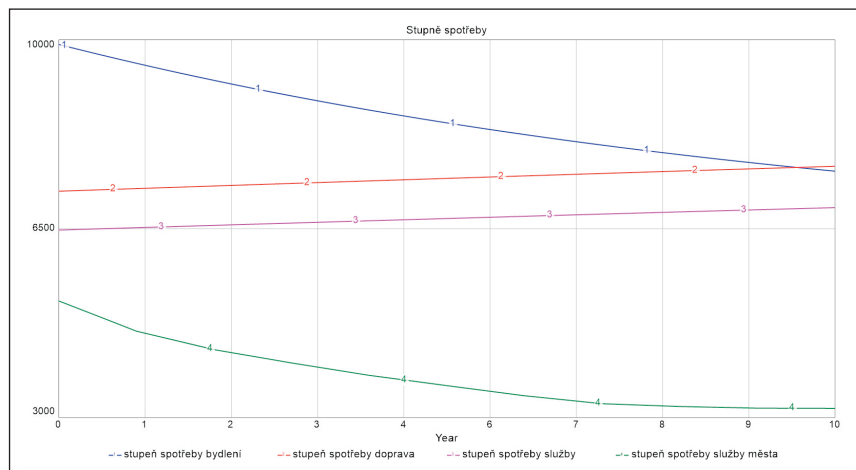
Na obr. 3 jsou vidět změny ve stupni spotřeby pro jednotlivé složky. Složka bydlení a služby města má klesající tendenci z důvodu realizovaných projektů úspor. Ostatní složky závisí především na počtu obyvatel, a tím dochází k růstu. Z obrázku je patrný význam snižování celkové spotřeby energie ve městech zlepšováním kvality budov.

Obr. 4 zobrazuje předpokládaný vývoj počtu obyvatel ve městě a zároveň uvádí měrnou spotřebu vztaženou na jednoho obyvatele. Počet obyvatel roste, ale měrná spotřeba klesá. Je to v důsledku zlepšení kvality budov a nové výstavby, která odpovídá současným požadavkům.

V grafu na obr. 5 je uvedena spotřeba energie po jednotlivých složkách. Jde o součet za sledované období, proto graf začíná na nulové hodnotě.

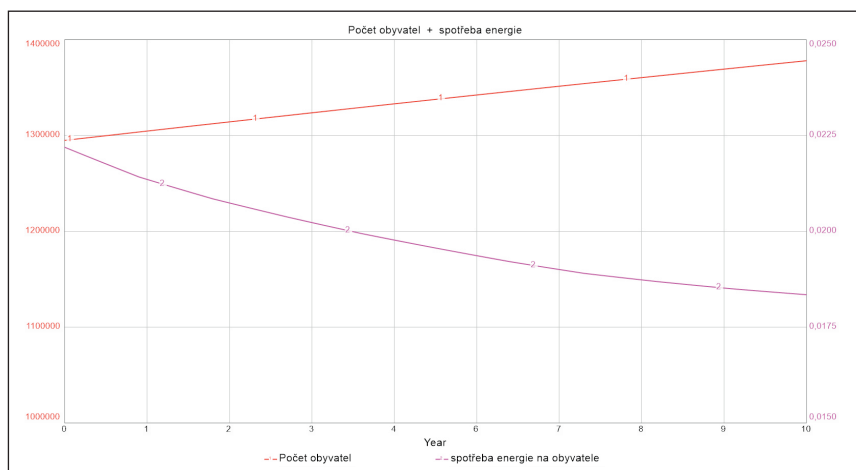
Zde je vidět význam fondu budov, a to především budov pro bydlení.

Výsledky odpovídají zadaným parametrům. Současná data se mohou v některých hodnotách lišit, je nutno ale brát v úvahu, že data pro tento druh modelování se získávají se zpožděním. Některé hodnoty parametrů jsou zadány pro zjednodušení jako konstanty, ale mohou být uvažovány jako časově proměnné. Tím je dynamika systému ještě zajímavější.



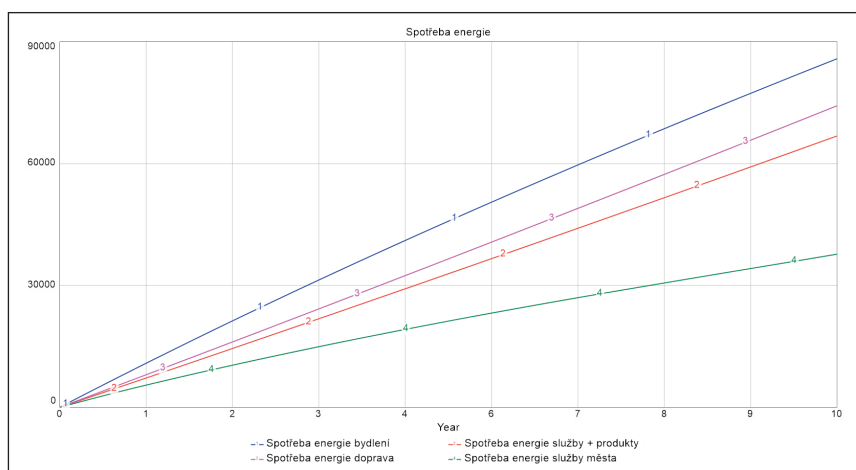
Obr. 3 Stupně spotřeby pro bydlení, dopravu, služby a produkty, služby města [MWh-rok⁻¹]

Fig. 3 Rates of consumption for housing, transport, services and products, city services [MWh-year⁻¹]



Obr. 4 Počty obyvatel a spotřeba energie na obyvatele (o) [MWh-rok⁻¹·o⁻¹]

Fig. 4 Number of inhabitants and energy consumption per capita (c) [MWh-year⁻¹·c⁻¹]



Obr. 5 Spotřeba energie pro jednotlivé složky [MWh]

Fig. 5 Energy consumption of individual components [MWh]

DISKUZE

Model reprezentuje jeden z možných přístupů k modelování podobných problémů. Samotný pojem „spotřeba energie ve městě“ je velmi diskutabilní, a pokud se rozhodneme navrhnout podobný model, je nutno předem definovat, s jakými složkami problému budeme pracovat. Zde byl zvolen více environmentální pohled z hlediska započítání energií v produktech využívaných obyvateli měst. V modelu se uvažují obyvatelé města, ale důležitým parametrem jsou i pracovníci, kteří sem dojíždějí do zaměstnání a na spotřebě se také podílejí. Je to námět pro další rozvoj modelu. Podobným problémem jsou i turisté, kteří zvyšují spotřebu v některých složkách (doprava, ubytování) o jednotky procent. Např. v roce 2020 to byl významný zdroj dynamiky z důvodu skokového poklesu počtu turistů.

ZÁVĚR

Vytvořený model umožňuje predikovat budoucí spotřebu energie ve městě s uvažováním výše uvedených omezení. Z důvodu migrace obyvatel budou tyto modely více využívány a zdokonalovány pro různé účely použití. Důležité bude pochopení všech existujících vazeb mezi prvky v reálném světě a jejich správné interpretování v modelu. Významnou složkou spotřeby jsou budovy. Výsledky naznačily, že mají nejvyšší potenciál úspor. Je proto nutno se dále zabývat strategiemi pro snižování jejich energetické náročnosti.

Kontakt na autora: vytlacil@fsv.cvut.cz

Poděkování: Tento výzkum byl realizován v rámci SGS20/103/ /OHK1/2T/11 Modelování procesů ve stavebnictví.

Použité zdroje:

- [1] GADONNEIX, P. *Energy and Urban Innovation*. World Energy Council, 2010.
- [2] MORECROFT, J. *Strategic Modelling and Business Dynamics*. Wiley: Chichester, 2008, s. 106–111.
- [3] STERMAN, J. D. *Business Dynamics – System Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill: Boston, 2000, s. 41–55.
- [4] PELTAN, T., MAIER, K., FRANKE, D., TUČEK, I. On commuting related energy consumption and its assessment. In: *Proc. of CESB 13 – Central Europe towards Sustainable Building*. Praha: GRADA, 2013, 903–906.
- [5] PEREIRA, I. M., SAD DE ASSIS, E. Urban energy consumption mapping for energy management. *Energy Policy*. 2013, Vol. 59, 257–269.
- [6] ČSÚ. Fluktuace obyvatel Prahy, 2017. Dostupné z: <https://www.czso.cz/>
- [7] NĚMEC, M. *Housing Stock in Prague*. Prague: Prague Local Authority Office, 2010.