

**Vysoká škola ekonomická v Praze**

Fakulta informatiky a statistiky

**Statistické modely trhu obnovitelných  
energií**

doktorská disertační práce

|                   |                                    |
|-------------------|------------------------------------|
| <b>Doktorand:</b> | <b>Ing. Petr Kozma</b>             |
| <b>Školitel:</b>  | <b>Doc.RNDr. Luboš Marek, CSc.</b> |
| <b>Obor:</b>      | <b>Statistika</b>                  |

**Praha, květen 2010**

## Obsah

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Úvod .....                                                             | 3   |
| 2. Obnovitelné zdroje energií .....                                       | 6   |
| 2.1. Fotovoltaika .....                                                   | 7   |
| 2.2. Termosolární ohřev .....                                             | 9   |
| 2.3. Větrná energie, bio a geotermální energie, malé vodní zdroje .....   | 11  |
| 2.4. Praktické využívání obnovitelných zdrojů energie v zemích EU .....   | 14  |
| 2.5. Technologické perspektivy fotovoltaiky a termosolárního ohřevu ..... | 16  |
| 2.6. Perspektiva solární energetiky v ČR .....                            | 19  |
| 3. Statistické metody .....                                               | 21  |
| 3.1. Statistický experiment .....                                         | 21  |
| 3.2. Náhodný výběr .....                                                  | 22  |
| 3.3. Vícerozměrná statistická analýza .....                               | 33  |
| 3.4. Interakce ve statistice .....                                        | 47  |
| 4. Analýza statistických dat z hlediska ekonomických modelů .....         | 59  |
| 4.1. Růstový model .....                                                  | 59  |
| 4.2. Model konstantní elasticity .....                                    | 60  |
| 4.3. Model variabilní elasticity .....                                    | 64  |
| 4.4. Zobecněný model .....                                                | 66  |
| 4.5. Aplikace modelových parametrů .....                                  | 69  |
| 5. Příspěvek k energetické bilanci .....                                  | 76  |
| 5.1. Statistické šetření .....                                            | 76  |
| 5.2. Modelové řešení .....                                                | 93  |
| 6. Modelové prognózy trhu obnovitelných energií .....                     | 97  |
| 7. Závěry .....                                                           | 102 |
| Literatura .....                                                          | 107 |
| Příloha A: Technické pojmy .....                                          | 111 |
| Příloha B: Soubor dat získaných statistickým šetřením .....               | 112 |
| Abstrakt .....                                                            | 117 |
| Abstract .....                                                            | 119 |
| Prohlášení .....                                                          | 121 |

# 1. Úvod

Cílem této disertační práce je příspěvek k aktuální problematice využívání obnovitelných zdrojů v ekonomice společnosti a to z hlediska těch poznatků, které jsou dnes k dispozici. Environmentální ekonomika představuje problematiku poměrně novou svým obsahem, která v ekonomické teorii zatím není příliš prozkoumaná ani publikovaná. Není dosud znám statistický model trhu obnovitelných energií, který by fundovaně umožnil vysvětlit některé ekonomické zákonitosti spojené s využíváním tohoto druhu energií. Přitom jsou již od roku 1990 k dispozici poměrně přesné statistické údaje na světovém trhu s obnovitelnými energiemi. Tento trh představují zejména fotovoltaika (přímá přeměna sluneční energie na elektřinu), termosolární ohřev (teplé užitkové vody), větrné a vodní generátory (přímá transformace mechanické energie na elektrickou), ale též bio a geotermální zdroje. Statistický průzkum těchto dat je nepochybně důležitý pro ověření fungování ekonomického modelu trhu, proto se v této práci zaměřujeme na statistickou analýzu dostupných dat týkajících se využívání obnovitelných energetických zdrojů a to v rámci ekonomických modelů trhu. Tato data jsou publikována v různých statistických přehledech (dominantními na světovém trhu s obnovitelnými energiemi jsou země EU, zejména SRN, dále USA a Japonsko), ročenkách, odborných časopisech a na webových serverech. Statistickou analýzou těchto dat lze ověřit modelové představy o fungování trhu s obnovitelnými zdroji a provést srovnávací analýzu z hlediska celkové energetické bilance, do které podstatnou měrou samozřejmě přispívají klasické energetické zdroje, založené na využití fosilních paliv (s tím souvisí též ochrana ovzduší v důsledku jeho zamoření oxidem uhličitým, vznikajícím při spalování těchto paliv) a využití štěpení uranu (jaderná energetika).

Z hlediska obsahu je tato práce členěna do sedmi kapitol: po této úvodní kapitole následuje kapitola druhá, věnovaná obnovitelným zdrojům energií; ve třetí kapitole popisujeme statistické metody, které jsme v práci použili: statistický experiment, metody náhodného výběru, metody vícerozměrné statistické analýzy a věnujeme se též interakci ve statistice. Stěžejní částí práce je čtvrtá kapitola, ve které popisujeme ekonomické modely: růstový model, model konstantní elasticity, model variabilní elasticity a zobecněný model, v jejich rámci provádíme analýzu dostupných statistických údajů s využitím teoretického statistického aparátu,

v posledním odstavci této kapitoly ilustrujeme příklady ekonomických výpočtů pro nejčastější případy instalací fotovoltaických a termosolárních zařízení v praxi. V uvažované energetické koncepci částečné náhrady klasických energetických zdrojů za obnovitelné zdroje patří velice důležité místo domácnostem, kde je velký potenciál ve využití fotovoltaických zařízení pro výrobu solární elektřiny a termosolárních kolektorů, používaných pro ohřev teplé užitkové vody. Z tohoto důvodu bylo třeba provést statistické šetření na náhodně vybraném vzorku domácností (rodinných domů a bytů) v různých regionech ČR: tomuto statistickému šetření, jeho analýze a výsledkům doplněných o modelová řešení věnujeme v kapitole páté. V šesté kapitole se zabýváme modelovými prognózami trhu obnovitelných energií a relevantní výsledky sumarizujeme v závěru disertace.

V práci jsou použity tyto statistické metody:

- Náhodný výběr (vlastní statistické šetření ohledně energetické spotřeby domácností - rodinné domy a byty)
- Dvojstupňová shluková analýza s využitím metody sdílených vážených průměrů GWSM
- Vícerozměrná statistická analýza: ověřování normality a vhodnosti dat (eliminace odlehlých pozorování), komponentní a faktorová analýza
- Interakce ve statistice: posouzení vlivu různých faktorů na energetickou spotřebu domácností a posouzení vlivu různých faktorů na možnou emisi skleníkových plynů
- Modelování dat v rámci ekonomických modelů a interpretace výsledků z hlediska obecné ekonomické statistiky
- Extrapolace dat, prognóza vývoje (časové řady).

Všechny statistické metody, které byly v práci použity, jsou přehledně popsány v kap. 3. Významná pozornost je věnována především metodám vícerozměrné statistiky a náhodného výběru, na které odkazujeme v dalších kapitolách, zejména v kap. 5 o námi provedeném statistickém šetření (korelace a faktorová analýza). Interakcím ve statistice je věnována pozornost zejména v souvislosti s analýzou dat ohledně zamoření životního prostředí a jeho možným dopadem na hospodářství (odst. 3.4.8). Problematika znečištění ovzduší exhalacemi při výrobě energií úzce souvisí právě s využitím obnovitelných zdrojů energie, avšak není hlavním cílem naší práce. Přesto se jeví užitečným přivést některé příklady řešení a právě aplikace

pro ekonomická data souvisí zejména s interakcemi ve statistice. Aplikace interakcí pro environmentálně ekonomická data je ilustrována rovněž v kap. 3; rozhodli jsme se uvést tyto příklady právě v této části disertace a oddělit tak statistické šetření (popis, výsledky, analýza) do samostatné části (kap. 5).

V práci jsou použity tyto ekonomické modely:

- Růstový model
- Model nabídky a poptávky s konstantní elasticitou
- Model nabídky a poptávky s variabilní elasticitou
- Zobecněný model

V práci jsou prezentovány tyto nové příspěvky:

- Statistické zpracování publikovaných dat v oblasti energetiky obnovitelných zdrojů od roku 1990 do roku 2008 včetně, s přihlédnutím k trhu fotovoltaických modulů a termosolárních kolektorů
- Statistické šetření dosud nepublikovaných údajů týkajících se energetické spotřeby domácností v České republice
- Praktické ověření ekonomických modelů na souboru environmentálně ekonomických dat
- Modelové prognózy trhu obnovitelných energií a jejich začlenění do celkové energetické bilance.

Některé výsledky, prezentované v této práci, již byly publikovány [23-36], a to v odborných časopisech: EURO (2007) [29], Stavební listy (2006 a 2007) [23,24,33], Alternativní energie (2009) [25,36], sbornících katedry matematiky VŠE Praha Mundus Symbolicus (2006, 2007 a 2008) [28,31,32,35]; rovněž byly prezentovány na 8. mezinárodní konferenci ENEF'08 (2008) o obnovitelných energiích [26], na 10. mezinárodní konferenci AMSE – Aplikace matematiky a statistiky v ekonomii (2007) [30] a na semináři prací účastníků vědeckého semináře doktorandů VŠE (2009) [34].

## 2. Obnovitelné zdroje energií

Ve světě se spotřebovává velké množství energie. Tento vývoj začal již koncem 19. století a úzce souvisí se spotřebním způsobem života v průmyslově rozvinutých zemích. Ačkoli cena energie je dnes vcelku na přijatelné úrovni, zásoby klasických energetických zdrojů jsou omezené a odhaduje se, že budou stačit na dalších asi 300 let za předpokladu, že se spotřeba energie nebude zvyšovat; nicméně spotřeba energie za více než posledních zhruba sto let vykazuje ve světě stabilní růstový trend, a to nejméně o 3 % ročně. Vývoj tedy sleduje růstový trend (každých zhruba 24 let se spotřeba energie zdvojnásobí) a lze odhadnout, že tento růst bude pokračovat rychleji jak z důvodů růstu světové populace (dnes zhruba dvě miliardy obyvatel planety se musí obejít bez elektřiny), tak i z důvodu nezadržitelného ekonomického pokroku v rozvojových zemích. Rostoucí spotřeba energie má za následek nežádoucí globální oteplování atmosféry v důsledku koncentrace oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ), jenž vzniká spalováním fosilních paliv. Růst koncentrace  $\text{CO}_2$  závisí na vývoji spotřeby energie a růstu populace. Vývoj spotřeby energie a energetických zdrojů ve světě lze modelovat na základě statisticky získaných údajů a měřitelných trendů za posledních zhruba sto let. Za předpokladu současného trendu (růst zhruba 3% ročně) bychom spotřebovali všechny dosud známé klasické energetické zdroje ještě před koncem tohoto století, přičemž ani úsporná opatření by nezměnila tento nepříznivý vývoj: při snížení růstu spotřeby na 1,5 % ročně bychom ovšem získali asi 20 let. Snižování energetické náročnosti umožní získat čas na efektivní zavedení obnovitelných energií ve velkém rozsahu.

Efektivní využívání alternativních obnovitelných zdrojů energie je tedy pro lidstvo nezbytností. Obnovitelnými zdroji energií jsou slunce (fotovoltaika – přímá výroba energie ze slunce, termosolární ohřev – přímá výroba tepla), vítr (přímá přeměna kinetické energie proudícího vzduchu na elektrickou energii), voda (vodní elektrárny), biotermální zdroje (tepelné elektrárny pro spalování biomasy a následná přeměna tepelné energie na elektrickou) a geotermální zdroje (získávání tepelné energie ze zemské kůry pomocí tepelných čerpadel). Výrobci a distributoři energií si význam obnovitelných zdrojů uvědomili již dávno a zahrnují je do svých dlouhodobých strategických a investičních plánů. Jde o nadnárodní společnosti operující na trhu s ropou, plynem a elektřinou, které ve svých předpokladech počítají se zvyšováním podílu obnovitelných zdrojů na celkové energetické bilanci během

následujících let. Dnes je ještě podíl obnovitelných zdrojů na celkovém množství vyráběné energie relativně malý, nicméně již existují fotovoltaické a termosolární systémy, jakož i větrné generátory, které lze efektivně využít pro výrobu energie.

Ochrana životního prostředí je jednou z největších výzev naší doby. Kvalita životního prostředí se za dobu, po kterou lidstvo využívá fosilní zdroje energií (přibližně od roku 1880) výrazně zhoršila, důkazem čehož může být neustále se zvyšující množství emisí škodlivého oxidu uhličitého – CO<sub>2</sub>. Kjótský protokol ukládá společenství států včetně EU snížit emise škodlivých zplodin o 8 % v letech 2008-2012 vzhledem k úrovni, která byla zaznamenána v roce 1990. Největší snížení emise plynů ze států EU je závazné pro průmyslově nejvyspělejší Německo. Tato země však tohoto snížení prakticky již dosáhla, a to především díky vyspělé technologii získávání tepelné a elektrické energie z ekologicky čistých obnovitelných zdrojů. Zde je na místě připomenout, že směrnice EU č. 77/2001 již stanovila jednotlivým členským zemím konkrétní podíl elektrické energie z obnovitelných zdrojů na celkové produkci vyráběné elektrické energie. Emise škodlivých plynů může být krátkodobě snížena efektivním využíváním a úsporami energií ze stávajících klasických energetických zdrojů (tepelné a jaderné elektrárny) a rovněž optimalizací energetické náročnosti moderních technologických procesů, trvalého snížení lze dosáhnout pouze zvyšováním podílu obnovitelných energií. To se ovšem neobejde bez zavádění nejmodernějších prostředků vědy a výzkumu jakož i technologických postupů, zaměřených na efektivitu procesu výroby energie. Důležitou roli hraje též efektivní financování z veřejných a soukromých zdrojů, neboť ekologicky čistá energie z obnovitelných zdrojů není samozřejmě levná. Na druhé straně je třeba si uvědomit, že na rozdíl od jaderné energetiky, která má k dispozici pouze omezené a „dočasné“ zdroje (uran), neexistují u ekologicky čistých zdrojů škodlivé odpady (vyhořelé jaderné palivo z uranových článků, které může představovat zdroj kontaminace životního prostředí po dlouhá léta). Přitom solární fotovoltaické a termické zařízení, větrné a vodní elektrárny, jakož i efektivní spalování biomasy mohou produkovat dostatek ekologicky čisté elektrické energie .

## **2.1. Fotovoltaika**

Fotovoltaika je přímá konverze světelného záření na elektrickou energii (fotovoltaický jev) v tzv. solárním článku: jde o polovodičovou součástku s jedním

nebo několika p-n přechody. Rozměry komerčně vyráběných solárních článků na bázi křemíku (monokrystalického nebo multikrystalického) jsou nejčastěji v rozmezí  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  (resp. 4" x 4") až  $200 \times 200 \text{ mm}^2$  (resp. 8" x 8") a tloušťky v rozmezí 150 až 350  $\mu\text{m}$ . V solárním článku, vystaveném expozici světla (fotonů) dochází k absorpci fotonů a v důsledku tzv. fotoelektrického jevu ke vzniku párů typu elektron-díra. Při dosažení p-n přechodu jsou náboje separovány – elektrony v N a kladné náboje v základním P typu křemíku. Na kontaktech solárního článku vzniká jednosměrné napětí a připojeným elektrickým obvodem proudí stejnosměrný proud. Charakteristickými parametry solárního článku jsou: napětí, proud, účinnost konverze světlo-elektrický proud (v procentech) a výkon (ve wattech). Elektrické parametry (volt-ampérová křivka) jakož i účinnosti a radiační závislosti se měří za standardních podmínek [46] tj. intenzita toku záření  $1000 \text{ W/m}^2$  a teplota  $25^\circ\text{C}$ .

Fotovoltaický solární článek je základním prvkem systémů pro přímou přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. Sériové uspořádání těchto článků do standardizovaných zasklených modulů rozměru daného hliníkovým rámem s využitím technologie laminace (zatavení do průhledných fólií pod skleněnou vrstvou) tvoří fotovoltaický (PV) panel, jenž je základním článkem instalace fotovoltaického systému na výrobu solární energie. Sériové spojení standardizovaných PV panelů obvykle o výkonu 150, 180 až 220 W umožňuje kompletní instalaci „fotovoltaické elektrárny“ a její napojení přes příslušná zařízení (měniče stejnosměrného napětí 24V nebo 36V na střídavé napětí 220V) na elektrickou síť (220V, 50Hz). Výroba fotovoltaických panelů prošla různými technologiemi vedoucími ke snížení výrobních nákladů; v současné době se používají dvě hlavní technologie. První je založena na využití křemíkových solárních článků z monokrystalického nebo multikrystalického křemíku. Technologie na bázi monokrystalického křemíku má nejvyšší účinnost konverze slunečního záření na elektrickou energii v rozsahu 18 až 20 %, poskytuje nejdelší životnost (podle měření radiační odolnosti je to 50 let), a zabezpečuje nejnižší pokles účinnosti a výkonu v čase. Technologie na bázi multikrystalického křemíku má nejvyšší účinnost konverze maximálně do 15 %, střední životnost kolem 30 let a skokový pokles účinnosti a výkonu v důsledku radiační degradace v čase. Druhá technologie, založená na využití tenké polovodičové fólie, využívá přímé vakuové napaření tenké vrstvy (tzv. „filmu“) z amorfního křemíku na sklo: má nízkou účinnost konverze

(maximálně 8 %), relativně krátkou životnost (asi 20 let) a lineární pokles účinnosti a výkonu.

Při instalaci PV panelů v solárních zařízeních je třeba vzít v úvahu jak umístění samotných panelů, tak i jejich orientace na zdroj záření (což ovlivňuje zásadním způsobem účinnost celého systému a tím i energetický příkon) a zeměpisnou polohu: k dispozici je tzv. mapa slunečního osvitu ČR. Český hydrometeorologický ústav uvádí 1400 hodin (Šluknovský výběžek), 1860 hodin (Znojmo) a pro lokality v blízkosti Prahy je to 1787 hodin slunečního svitu ročně.

## **2.2. Termosolární ohřev**

Enormní potenciál solární energetiky dokumentujeme nejlépe faktem, že na naši planetu ve formě slunečního záření dopadá téměř 200 milionů GW energie. V současné době však lidstvo spotřebuje pouhých 10 milionů GW. Měření slunečního záření v našich zeměpisných šířkách a klimatických podmínkách prokázalo, že za rok průměrně dopadá 950 – 1150 kWh na jeden metr čtvereční.

Dopad slunečních paprsků je nerovnoměrný (cyklus den-noc, léto-zima, proměnlivé počasí), v letním pololetí dopadá 75 % a v zimním pololetí, kdy energetická spotřeba domácností kulminuje, je to pouze 25 % ročního solárního příkonu. Z celkové roční spotřeby průměrné české domácnosti připadá 90 % na topení a ohřev teplé užitkové vody (TUV) a pouze 10% na výrobu elektrické energie. Určitou část z těchto 90 % tepelné energie lze pokrýt ze solárního kolektoru, termického zařízení, které dodává teplo v rozsahu 70 až 90 stupňů Celsia. Solární kolektor konvertuje sluneční záření na tepelnou energii prostřednictvím teplonosné látky do potrubí rozvodné sítě a je centrálním prvkem solárního systému na ohřev TUV.

Kompletní solární systém pro jednu domácnost, obsahuje několik solárních kolektorů (optimální plocha je 10 až 12 m<sup>2</sup>, tlakové zatížení 6 až 8 barů a nejvyšší zatížení střechy 300 až 400 kg), montážní příslušenství, solární řídicí jednotku a čerpací jednotku, solární expanzní nádobu (60-80 litrů), odlučovač vzduchu, regulátor teploty a bivalentní (dvojokruhový) zásobník pro ohřev TUV (objem 400-600 litrů dle počtu instalovaných kolektorů). Množství tepelné energie, které lze získat solárními kolektory, závisí na typu kolektoru (absorpční, vakuový deskový nebo vakuový trubicový), jeho instalaci (optimální umístění) a na celkovém

technickém provedení (optimalizace teplovodního vedení, obvykle měděných trubek).

V našich klimatických podmínkách lze pro celoroční ohřev TUV úspěšně využít absorpčních kolektorů s relativně nízkými investičními náklady. Naopak nejvyšší třída, solární kolektory s vakuovými trubicemi, mají oproti deskovým vakuovým kolektorům výrazně vyšší účinnost přeměny tepla, neboť kromě přímých slunečních paprsků dokáží zužítkovat i difúzní záření rozptýlené v atmosféře na molekulách vody a vzduchu. Jejich účinnost v průběhu roku neklesá pod 60 %, zatímco například u deskových klesne v zimních měsících na 20 – 25 %. Celoroční vytápění a ohřev TUV nezvládne ovšem žádný solární systém sám, je potřeba jej doplnit jiným, nezávislým zdrojem (kotel na plyn, elektrická spirála), přičemž řídicí jednotka automaticky volí takový režim, aby udržovala přednastavenou optimální teplotu. Přesto slunce dokáže při vhodném využití solárního systému zabezpečit 40 – 60 % nákladů na vytápění a ohřev TUV domácností. Přitom lze přebytek teplé vody v letních měsících využít k ohřevu vody ve venkovním bazénu a prakticky tak prodloužit jeho možnou dobu efektivního využívání až o tři měsíce.

Solární kolektory na ohřev TUV lze jednoduše instalovat na šikmých i plochých střechách rodinných i bytových domů. Nejvhodnější je úhel 30 až 60 stupňů. Z hlediska investičních nákladů se jeví optimální instalace 5-6 solárních kolektorů o celkové ploše 10-12 m<sup>2</sup> („standardní plocha“ jednoho solárního kolektoru je 2m<sup>2</sup>). V případě solárního přitápění budov a venkovních bazénů v zimním období má své opodstatnění využití nejdražších a nejúčinnějších vakuových trubicových kolektorů.

Důležitými prvky solárního systému je elektronická regulace a jištění elektro-mechanickými ventily. Elektronická řídicí jednotka zajišťuje signální regulaci přihřívání výměníku s TUV na nastavenou optimální teplotu, obvykle kolem 60 °C (jak jsme již uvedli, solární systémy je nutné kombinovat také s jinými zdroji, poněvadž většinou zajišťují tzv. předehřev) a dále jistícími prvky proti přehřátí i kontroluje a sama zajišťuje případnou potřebu odvzdušnění prostřednictvím expanzní nádoby, pojistného a expanzního ventilu. Pro bezchybné celoroční využití systému je také nutné použití nemrznoucí solární kapaliny, která slouží jako médium pro výměnu tepla mezi kolektory a výměníkem a na rozdíl od vody má nejen nižší bod tuhnutí, ale i vyšší bod varu a menší tepelnou roztažnost.

Výpočet konkrétní sestavy solárního systému na ohřev TUV provede specializovaný počítačový program. Zároveň sestaví optimální počet kolektorů, druh a velikost výměníku tepla a celkově optimalizuje parametry jednotlivých prvků systému, včetně jejich prostorového umístění pro konkrétní instalaci. Součástí výpočtu je i kalkulace nákladů. Kompletní systém navržený pro konkrétní domácnost nepředstavuje vyšší investici než 100000 Kč. Pořizovací náklady může snížit státní dotace, a to obvykle až o 40 % z celkové ceny. Návratnost tak při efektivním využití vhodně navrženého systému může být jen 8 let, ačkoli minimální životnost celého systému je 20 až 25 let, některých komponent i mnohem delší. Jedinou potřebnou servisní údržbou je pak výměna nemrznoucí solární kapaliny každých 5 let.

### **2.3. Větrná energie, bio a geotermální energie, malé vodní zdroje**

**Větrná energie** je obnovitelným zdrojem, který přispívá do celkové energetické bilance ČR zatím zanedbatelnými 0,4 %; možnosti využití větrných generátorů na území ČR nelze v žádném případě srovnávat s těmi, které mají přímořské země (SRN, Dánsko, Holandsko). Přesto nelze jednoznačně využívání větrné energie vyloučit, je však možné jednoznačně potvrdit, že tento způsob získávání alternativní energie má největší počet odpůrců. Je to proto, že větrné generátory (turbíny s vodorovnou osou otáčení pracující na vztakovém principu, kdy vítr obtéká lopatky generátoru), které přímo mění mechanickou energii na energii elektrickou, vypadají nevzhledně, jejich instalace ve volné přírodě narušuje přirozený ráz krajiny a otáčení vrtule generátoru působí nadměrný hluk (větší než 140 dB). Zatím jsou v ČR instalovány větrné elektrárny o výkonu asi 20 MW, avšak jsou připraveny projekty velkých investorů z Rakouska, SRN a Velké Británie, které mají tuto hodnotu zvýšit až na 800 MW do roku 2015. V každém případě by však měla být instalována zařízení, která budou brát zřetel na podmínky umístění v krajině, zvláště pak na základní meteorologické podmínky jako rychlost větrů, jejich četnost a pravidelnost („větrná mapa“ Českého hydrometeorologického ústavu). Nové větrné elektrárny budou muset být budovány s rozmyslem už s ohledem na rovnováhu energetické sítě: nedostatek větru (nelze predikovat ani modelovat) a s tím spojené problémy s vybudováním tzv. „záložných energetických zdrojů“. Zatímco u slunečné energetiky lze pracovat s poměrně přesnou informací o toku záření za jeden rok na

metr čtvereční v dané lokalitě (v našich klimatických podmínkách je to 800 až 1050 kW/m<sup>2</sup> za rok), nelze množství, intenzitu, ani rychlost větru v dané oblasti přesně určit; v tomto směru jsou na tom lépe generátory umístěné v moři, kde je stálá přítomnost „vhodného“ větru. V našich podmínkách lze na základě jednoduchých výpočtů odvodit, že minimální rychlost větru potřebná pro provoz větrné turbíny je asi 4,8 m/s (tedy asi 17,2 km/h); ve větrných lokalitách ČR je dlouhodobě zjištěný průměr pouze 2,4 m/s (tedy asi 8,6 km/h). Větrné generátory budou tedy pracovat pouze s 50% účinností a na každé dva generátory bude třeba připravit „záložný“ zdroj o stejném instalovaném výkonu. Větrné elektrárny tudíž neprodukují elektrický proud trvale, ale pouze v době, kdy se točí jejich vrtule. Elektřina se tak vyrábí v intervalech, které nelze předpovědět na delší časový úsek dopředu. Jde o systémové důsledky, které mohou způsobit nepříznivé efekty, směřující proti myšlence efektivního využívání obnovitelných energií a tím i proti samotné myšlence liberalizace trhu s obnovitelnými energiemi.

**Biomasa** je produktem fotosyntézy rostlin a tento produkt je znám v různých formách: pro energetické využití jsou vhodné dřevnatější a vláknité rostlinné tkáně, dřevěné odpady ve formě tzv. pelet. Emise z pelet jsou výrazně nižší než je tomu u fosilních paliv, biomasa je takzvaně „CO<sub>2</sub> neutrální“, pelety neobsahují ani síru, obsah dusíku je pětikrát nižší než u spalování fosilních paliv, biomasa neobsahuje ani těžké kovy, které stále více zamořují ovzduší. Využitelná energie biomasy je 13 až 18 MJ/kg (dle obsahu vody). Biomasu lze využít pro spalování nebo ji biochemicky transformovat na biopaliva, tedy bioplyn, bionaftu a etanol. Biomasa by mohla být skutečně významným obnovitelným zdrojem pro ČR, problémy však mohou vznikat se zajištěním biomasy za přijatelnou cenu. Příležitostí na trhu se chopili velcí výrobci (např. ČEZ a jeho instalace největší biospalovny v Hodoníně, která vyrobí až 300 tisíc MWh elektřiny pro téměř 70 tisíc domácností, čímž se ušetří až 200 tisíc tun lignitu) a do kotlů na fosilní paliva začali přikládat biomasu. Tím získávají za část takto vyrobené energie výhodnější cenu. Během krátké doby tak začala cena biomasy kvůli zvýšené poptávce výrazně stoupat. Velké energetické firmy mohou tedy spalovat velké množství biomasy s minimálními investičními náklady. Tím jsou ovšem znevýhodněni drobní výrobci, neboť návratnost jejich investic do lokálních zařízení na výrobu a spalování biomasy se tak při zdražování vstupů (biomasy) zhoršuje, či dokonce znemožňuje. Ani nový zákon o využívání obnovitelných energií nepřinesl v tomto směru jednoznačné řešení.

**Geotermální energie** má ze všech obnovitelných energetických zdrojů nejmenší využitelný potenciál. Zdrojem geotermální energie (někdy se užívá též pojmu „energie mělkého horninového prostředí“) jsou gejzíry, sopky, horké prameny, parní výrony a podobně. V ČR je několik regionů, kde lze tohoto energetického zdroje využít (geotermální vytápění Děčína), nicméně nejznámějším způsobem využití geotermální energie v našich geografických podmínkách představuje aplikace tzv. tepelného čerpadla pro vytápění rodinných domů, případně i jiných objektů s nízkou energetickou náročností. Tepelné čerpadlo pracuje na principu tzv. „obrácené chladničky“: výměník tepla na zadní straně chladničky hřeje, odevzdává tak prostoru vytápěné místnosti teplo, které převedlo z nižší tepelné hladiny +5 °C až 10 °C (prostor uvnitř chladničky) na hladinu vyšší 20 °C až 25 °C na povrchu tepelného výměníku. Tepelné čerpadlo tak topí v prostoru (vytápěné místnosti) a ochlazuje jiné médium (vzduch v okolí domu, podzemní vodu, geotermální vodu, atd.). Je třeba si uvědomit, že tepelné čerpadlo nepokryje celou spotřebu tepla, je nutné mít záložní zdroj pro nepříznivé období. Velkou nevýhodou tepelného čerpadla je jeho vysoká pořizovací cena, vysoké náklady na instalaci a od minulého roku též ztráta státní dotace tohoto programu.

**Vodní elektrárny** mají v naší zemi dlouholetou tradici a v provozu je značné množství vodních elektráren vybudovaných na všech významných českých říčních tocích. Vodní tok je v přírodě nositelem energie mechanické, kterou lze pomocí turbíny-generátoru převést přímo na energii elektrickou. Výkon vodních elektráren nelze srovnávat s výkonem klasických elektráren, vodní elektrárny slouží pouze jako záložní energetické zdroje, které dodávají elektrický proud do sítě v době tzv. „energetické špičky“. Proto je do obnovitelných zdrojů ani nezařazujeme (už i z toho důvodu, že jsou po dlouhou dobu využívání brány jako neoddělitelná součást klasického energetického systému země). Z hlediska obnovitelných zdrojů lze mluvit o tzv. **malých vodních elektrárnách**, založených na principu změny tlaku vody při průchodu turbínou. Ty jsou však zatím nepříliš efektivními zdroji energie a jejich nízká účinnost leží pod hranicí energetického využití.

## **2.4.Praktické využívání obnovitelných zdrojů energie v zemích EU**

Vyspělé země EU, kam nyní patří i Česká republika, jednoznačně pochopily význam využití obnovitelných zdrojů energie pro hospodářství a kvalitu životního prostředí. Některé z nich, zejména SRN, Itálie, Nizozemí, Španělsko a Francie, již dříve zavedly legislativní a ekonomická opatření k efektivnímu zhodnocení těchto zdrojů. Lídrem ve využívání obnovitelných zdrojů energií je v EU nepochybně Německo. Od roku 1990 je v této zemi nepřetržitě zaznamenáván trvalý nárůst zejména ve využívání solární energetiky, tedy fotovoltaiky a termosolárního ohřevu užitkové vody. Využívání a rozvoj obnovitelných zdrojů energie v Německu má jasný legislativní rámec daný zákonem o podpoře využívání obnovitelných zdrojů, jenž výrobcům ekologicky čisté energie garantuje dotované výkupní ceny. Výrobní, vědecký a finanční potenciál, kterým Německo disponuje v oblasti fotovoltaiky, se již projevil ve významných realizovaných projektech. Jedním z nejvýznamnějších je projekt nazvaný 100000 solárních střeš, realizovaný v letech 1997 až 2000 s významnou státní podporou. V rámci tohoto projektu bylo instalováno na střechách rodinných domů sto tisíc solárních fotovoltaických „mikro-elektáren“ o celkovém výkonu až 250 MW. Podpora tohoto projektu byla zajištěna dvěma pilíři a to státem garantovanými výkupními cenami za kWh vyrobené čisté elektrické energie a státem garantovanými výhodnými půjčkami zájemcům o instalaci a provoz fotovoltaických „mikro-elektáren“. Po velkém úspěchu pilotního programu došlo i na realizaci jeho volného pokračování s pracovním názvem 70000 solárních střeš, opět o celkovém výkonu až 250 MWp (průměrný instalovaný výkon jedné „mikroelektárny“ je 3,5 kW) a garantovaná výkupní cena čisté elektrické energie je 0,4965 EUR za kWh. Průměrná cena na pořízení této domácí fotovoltaické „mikroelektárny“ je v Německu 16500 EUR, což lze při roční výrobě 3000 kWh zaplatit za 12 let a přitom životnost této technologie je minimálně trojnásobná. Celkový instalovaný výkon 500 MW na 170000 střechách znamená zásobování elektřinou přibližně pro jeden milion obyvatel. Návratnost investic při pořízení fotovoltaických „mikro-elektáren“ o výkonu do 5 kW je zhruba 10 až 12 let, přičemž dalších 28 až 40 let tato zařízení produkují elektřinu bezplatně. Výše uváděná průměrná fotovoltaická „mikro-elektárna“ o instalovaném výkonu 3,5 kW (na ploše střechy rodinného domu přibližně 30m<sup>2</sup>) za 15 let provozu vyrobí téměř 65 MWh ekologické elektřiny a za

tuto dobu zabrání znečištění ovzduší téměř čtyřiceti tunami oxidu uhličitého. Do konce roku 2008 bylo v SRN instalováno více než 5 GW fotovoltaické energie a nyní v oblasti fotovoltaiky pracuje v této zemi více než 120 tisíc vysoce kvalifikovaných specialistů. Mezi nejvýznamnější projekty patří stavba fotovoltaické solární elektrárny v Gottelbornu, kde instalovaný výkon 7,4 MW (50000 solárních panelů) pokrývá spotřebu asi čtyř tisíc domácností. Ze zajímavých projektů realizovaných v zemích EU nelze nezmínit fotovoltaickou elektrárnu o instalovaném výkonu 3,3 MW na Sicílii, která vyrábí až 3600 MWh elektřiny ročně s téměř nulovými provozními náklady a též unikátní fotovoltaickou elektrárnu (souvislá solární střecha sestavená z několika tisíc fotovoltaických panelů o rozměrech větších, než je fotbalový stadion) instalovanou v letech 2002-2003 v Holandsku na trvalé světové výstavě květin „Floreade“, sloužící k autonomnímu zabezpečení elektrickou energií celého výstavního areálu.

Termosolární ohřev teplé užitkové vody v solárních kolektorech má ve vyspělých evropských zemích více než třicetiletou tradici. Tehdy se začaly vyrábět první ploché absorpční kolektory, pracující na principu absorpce slunečního záření solární kapalinou v měděné trubce uvnitř zaskleného solárního kolektoru v hliníkovém rámu. Technické zdokonalení představují tzv. vakuové kolektory s vysokou účinností tepelné přeměny, což umožňuje jejich efektivní využití v oblastech se sníženou intenzitou slunečního záření a prudkými výkyvy okolních teplot. Odhaduje se, že za posledních 30 let bylo v západní Evropě instalováno téměř 10 milionů  $\text{m}^2$  (z toho jen v Německu více než polovina) plochy solárních kolektorů na výrobu tepla ze slunce (průměrný tepelný výkon solárního kolektoru je přibližně  $500 \text{ kWh/m}^2$  ve standardních klimatických podmínkách), což znamená, že solární ohřev využívá v EU nejméně jeden milion domácností. Průměrná cena (včetně tepelného výměníku, expanzních nádob, elektronického regulačního systému, elektromechanických ventilů a instalace)  $10 \text{ m}^2$  absorpční plochy (plně dostačující pro průměrnou domácnost) je 7,5 až 10 tisíc EUR, přičemž ušetřené náklady na vytápění nebo ohřev TUV dosahují ročně 900 až 1150 EUR. Návratnost investice lze očekávat přibližně v horizontu 8 až 12 let, přičemž životnost solárních kolektorů je nejméně dvojnásobná (renomovaní výrobci poskytují na svá zařízení záruku 25 let). Finanční podpora v SRN z veřejných rozpočtů může dosáhnout až 40 % celkových pořizovacích nákladů investice. Ve Francii je to naopak jednorázový příspěvek ve výši 1780 až 2700 EUR na systém kolektorů a nenávratný příspěvek na výměník

tepla 1370 EUR. Na instalaci těchto systémů poskytují různě velké dotace také vlády Řecka, Portugalska a Španělska. Termosolární ohřev TUV představuje ve vyspělých zemích EU nejperspektivnější a relativně nejlevnější zdroj získávání tepelné energie z obnovitelného zdroje, v tomto případě ze slunce.

Současný instalovaný výkon z větrných elektráren na úrovni 2,2 GW staví SRN na první místo ve světě; nový projekt výstavby větrných generátorů v Severním a Baltském moři by měl do roku 2030 přispět výkonem 20 GW, čímž by tato země EU mohla pokrýt až čtvrtinu své spotřeby elektřiny právě z tohoto obnovitelného zdroje. Základem „německého větrného boomu“ je zákon „Renewable Energy Act“, který výrobcům této ekologické elektřiny garantuje pevné výkupní ceny v dlouhodobém horizontu. Vodní elektrárny mají v zemích EU dlouholetou tradici a v provozu je značné množství těchto energetických zařízení vybudovaných na všech energetických tocích. Toto odvětví však patří do již vybudované energetické „klasické“ sítě, v posledních letech se nevyvíjí (pro výstavbu dalších vodních elektráren již není místo) a z hlediska obnovitelných zdrojů lze uvažovat pouze získávání energie z malých vodních zdrojů, jejichž příspěvek v rámci EU lze považovat za zanedbatelný. Rovněž využití geotermálních energetických zdrojů na svůj marketingový „boom“ teprve čeká.

Česká republika, která zatím ve velmi omezené míře využívá obnovitelných zdrojů energií (v současné době je to podíl necelých 4 procent na celkové energetické bilanci země), má vzhledem k přijatému zákonu o podpoře obnovitelných zdrojů významný potenciál zejména při využití solární energetiky, především fotovoltaiky; zákon o podpoře výroby energií z obnovitelných zdrojů stanovil principy garantovaných výkupních cen (případně náhrad ve formě zelených bonusů, což podnítilo „český solární boom“ v posledních dvou letech. Prodloužením garantovaného výkupu fotovoltaické elektřiny (z 15 na 20 let) a nastavením (ERÚ ČR) výkupních cen pro fotovoltaické elektrárny instalované do konce roku 2009, umožní i v ČR dosáhnout jednak vyšší podílu využívání energií z obnovitelných zdrojů a zároveň zkrátit dobu návratnosti této investice.

## **2.5. Technologické perspektivy fotovoltaiky a termosolárního ohřevu**

Technologie pro výrobu solárních článků využívá vlastnosti různých polovodičových materiálů: křemík, polovodičové slitiny typu  $A_{III}B_V$ , tenký film

EFG, amorfni křemík (a-Si:H), tenká vrstva teluridu kadmia (CdTe) nanášená technologií vakuového napařování a další. Ne všechny technologie vyvinuté v laboratořích lze efektivně uplatnit v komerční výrobě solárních článků. Rozhodujícím faktorem je z hlediska výroby především nejnižší cena solárního článku za jeden watt. Výzkum, vývoj a výroba solárních článků se tedy zaměřují na využití dostupných materiálových substrátů (nejčastěji křemík), zvětšení účinnosti konverze, zvýšení výkonu na jednotku plochy a dlouhodobou výkonovou stabilitu při co možná nejmenším počtu výrobních operací na jednotku plochy solárního článku a nejmenší ceně vstupního materiálu. Z tohoto hlediska je křemík (ve formě monokrystalické, polykrystalické i amorfni) nejdůležitějším materiálem. Výroba monokrystalického křemíku (metodou CZ Czochralski) je zvládnutá již řadu desetiletí v oblasti výroby polovodičových prvků (diody, tranzistory, tyristory, mikročipy, CMOS, CCD a jiné). Nicméně, i při současných vysokých cenách polykrystalického křemíku (Virgin Poly) vhodného na výrobu solárního (SGP = Solar Grade Poly) monokrystalického křemíku (P-typ, specifický odpor 0.5 až 3 Ohm/cm) spotřeba polykrystalického křemíku (GT Technology: PV Casting) rovněž výrazně roste, a to přímo a výlučně pro využití ve fotovoltaice. Cena solárního článku vyrobeného z multikrystalického křemíku je sice nepatrně nižší, avšak tento typ solárního článku nemůže konkurovat monokrystalickému solárnímu článku zejména účinností (14-16 % běžný standard, 20-24 % při extrémně čistých materiálech), ani co se týče dlouhodobé výkonové stability. Dominantní světový producent křemíku, Dow Chemicals Corp., v současnosti nabízí křemík typu S.O.G., který v Brazílii vyrábí jedna z jeho společností Condor Manufacturing Ltd. (zaručuje specifický odpor >0.5 Ohm/cm vyrobeného substrátu S.O.G.) a tímto substrátem přednostně zásobuje výrobce používající GT technologický postup známý jako PV (PhotoVoltaic) Casting. Jde o přímý proces „tavení“ křemíku (metodou Siemens) do připravené formy (rozměrů, z nichž lze mechanickým opracováním a přesným drátovým řezáním vyrobit solární multikrystalickou vrstvu (wafer) rozměrů 156 x 156 mm<sup>2</sup> (tloušťky 195 – 280 μm). Z této vrstvy se pak vyrábí kvalitní multikrystalické solární články (charakteristického atraktivního vzhledu) o účinnostech konverze v rozsahu 11–14 %. Dow Chemicals Corp. vyrábí v Japonsku též amorfni křemík typu a-Si:H. Je to nekrystalická forma křemíku pro výrobu SC malých rozměrů s velice nízkou účinností konverze (5 až 7 %) a navíc s velmi malou radiační odolností (předpokládaná doba použití těchto SC je maximálně 15-20 let).

Tuto technologii (tenká vrstva resp. tenký film) používá v Japonsku firma KYOCERA (a to i při výrobě prvků pro spotřební elektroniku), v Evropě pak známý maďarský holding Energo Solar a HelioGrid Hungary. Některé společnosti v Japonsku se zabývají možností využití atraktivní technologie tenkovrstvého filmu polykrystalického materiálu teluridu kadmia CdTe, přičemž lze dosáhnout relativně vysokých konverzních účinností (14-18 %). Cena monokrystalického CdTe je však v současnosti větší než 25000 USD/kg, což platí i pro ostatní „exotické“ polovodičové krystaly typu  $A_{III}B_V$ , například GaAs (účinnost konverze až 24-28 %). Z uvedeného je patrné, že jak samotné čisté křemíkové substráty (polykrystalický, monokrystalický, amorfnní a křemík S.O.G.), tak i „zbytkové“ komponenty vzniklé v procesu výroby (remelt, top-and-tails, scrap) představují v současnosti i v budoucnu jediné reálně možné vstupy do výroby solárních článků pro využití pro fotovoltaické účely.

Výzkum vlastností solárních článků na bázi křemíku se týká především dlouhodobé výkonové stability; po dlouhodobé expozici (30 let) dochází k degradaci výkonu ozářeného solárního článku v rozmezí 0,38 % až 1,28 % za rok.

Perspektiva fotovoltaiky je tedy spojena především s efektivní výrobou kvalitního krystalického křemíku. Monokrystalické solární články mají lepší radiační odolnost a lepší dlouhodobou výkonovou stabilitu než je tomu u solárních článků vyrobených z multikrystalického křemíku. Výkon monokrystalického solárního článku klesá v čase pouze o několik desetin procenta za rok. Poslední výsledky ukazují významný pokrok ve výrobě solárních článků vyrobených z monokrystalického křemíku solární kvality (SGP). V tomto případě zaznamenáváme téměř zanedbatelnou degradaci výkonu monokrystalického solárního článku, a to i v průběhu nepřetržitého třicetiletého užívání (celkový pokles výkonu za dobu 30-ti let je menší než 2,3 %). U multikrystalických solárních článků, vyrobených technologií PV Casting, je zatím výkonová stabilita nižší. To se týká rovněž poklesu účinností (faktor 2 až 3 krát) těchto solárních článků. Musíme však zdůraznit, že jde o relativně novou aplikaci křemíku nového typu, a že vývoj v oblasti nových materiálů pro tuto technologii je vlastně na začátku. Cílem takového výzkumu bude výroba křemíku s „dostatečnými“ fyzikálními a chemickými vlastnostmi pro solární PV casting za „rozumnou“ výrobní cenu. Nejde samozřejmě o polykrystalický křemík elektronické kvality, kterou si vyžaduje výroba polovodičových prvků. Lze předpokládat, že nový materiál typu S.O.G. bude možno

používat v kombinaci s různými odpadními materiály, které již nebude možné využívat v polovodičové technologii. Nelze též vyloučit aplikaci tohoto kombinovaného substrátu i pro růst monokrystalů solární kvality v tažičkách využívajících ultrazvukového efektu.

Výroba termosolárních kolektorů je zřejmě na vrcholu současných technologických možností, zlepšení účinnosti lze ještě očekávat u vakuových kolektorů. Ačkoli vakuum řádu  $10^{-5}$  torr je relativně drahé, je vysoce efektivní pro účinnost tepelné konverze. Vakuové termosolární kolektory tohoto typu se používají zvláště v méně příznivých klimatických podmínkách (severní Evropa), a proto má jejich vyšší cena své opodstatnění. U standardních absorpčních kolektorů je nenahraditelná měď, pro všechny typy termosolárních kolektorů je pak vysoce důležitá transmise použitého skla (obvykle tloušťek v rozmezí 3 až 8 mm, rozměrů minimálně 1 x 2 m), která v rozsahu vlnových délek 3600 až 7600 nm by měla být větší než 94%. Výzkum a vývoj v této oblasti se proto orientuje zejména na vlastnosti zmíněných materiálů: výroba čistého skla s vysokou transmisí světla v oblasti viditelného záření, výroba skleněných trubek pro vysoké vakuum a též levný způsob čištění mědi, používané v trubkách absorpčních kolektorů.

## **2.6. Perspektiva solární energetiky v ČR**

Česká republika se při vstupu do Evropské unie zavázala, že do roku 2010 dosáhne osmiprocentního podílu vyrobené elektrické energie z obnovitelných zdrojů (biomasa, vítr, voda, geotermální energie, solární energie), který byl později navýšen až na 10 % do roku 2012. Tento úkol bude obtížně splnitelný, když v roce 2008 kryla Česká republika pouze 3,5-4 % výroby elektrické energie na našem území z obnovitelných energetických zdrojů. V ČR je pro řadu investorů jak z řad privátní, tak i municipální sféry perspektivním zdrojem právě solární (sluneční) energie, kterou lze využít v našich geografických podmínkách, kdy na jeden metr čtvereční dopadá za rok sluneční záření o intenzitě v průměru 860 kWh. Sluneční energie je na rozdíl od fosilních, tedy vyčerpatelných zdrojů, zdarma, je však třeba zaplatit za její efektivní přeměnu na teplo (ohřev TUV v takzvaných solárních kolektorech) a elektřinu (fotovoltaika – přímý způsob přeměny slunečního záření na elektrickou energii v solárních článcích a panelech).

Průměrný výkon termosolárního kolektoru je  $500 \text{ kWh/m}^2$ , průměrná účinnost solárního článku (základního prvku fotovoltaického panelu) na bázi multikrystalického nebo monokrystalického křemíku dosahuje 13 – 17 %. Od těchto údajů se pak odvíjí cena instalace pro daný produkt. Tak například průměrná cena zařízení o deseti metrech čtverečních absorpční plochy zařízení (dostačující pro ohřev TUV průměrné domácnosti s minimální nutností využití jiného energetického zdroje) činí asi 100000 Kč (jen pro srovnání, cena instalace tepelného čerpadla je více než trojnásobná). Průměrné ušetřené náklady domácnosti na ohřev TUV mohou dosáhnout až 10.000 Kč za rok, takže tato investice včetně případného servisu by se měla vrátit bez pomoci státu do dvanácti let. Naproti tomu, instalace domácí fotovoltaické „mikroelektrárny“ o výkonu 3 kW s roční produkcí 3,2 až 3,5 tisíce kWh (dostačující pro výrobu elektřiny pro průměrnou domácnost bez použití elektrického vytápění) představuje investici v rozsahu nejméně 400000 Kč. Návratnost této investice bez státní podpory při relativně nízkých cenách energií v ČR je prakticky několik desítek let. Vysoká investiční náročnost a neexistence možnosti institucionálního financování je tedy jedním z hlavních důvodů, proč domácnosti zatím jen velmi málo využívají tento zdroj. Naproti tomu se v ČR realizuje mnoho projektů na výstavbu malých a středních fotovoltaických elektráren o instalovaném výkonu 0,5 MW až 2,5 MW především díky možnosti získání dluhového financování od bank pro průmyslovou výrobu elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Tyto průmyslové elektrárny však často využívají nejlevnější dostupné technologie, aby maximalizovaly poměr výnos/cena investice nehledě na účinnost nebo životnost tohoto zařízení. ČR je přitom jednou z vyspělých zemí, kde se dosud vyrábí solární články i fotovoltaické panely na bázi monokrystalického křemíku a jiné komponenty pro výrobu fotovoltaických panelů (speciální sklo, hliníkové rámy, natáčecí systémy apod.). Již v roce 1995 byla k energetické síti připojena první fotovoltaická elektrárna o výkonu dnes již zanedbatelném výkonu 10 kW na Mravenečníku v Jeseníkách. Celá elektrárna byla zhotovena v ČR. V Evropě i v Japonsku bylo instalováno mnoho zařízení, které obsahují české komponenty, do výroby fotovoltaických panelů v ČR investovaly společnosti jako RWE Schott Solar nebo Kyocera. Uvažovaný vstup dalších investorů do ČR by mohl mít pozitivní vliv především na využití „domácí“ technologie při instalacích fotovoltaických elektráren a nahradit tak levná zařízení z Asie. To by přispělo k vytvoření nových pracovních míst a napomohlo přílivu zahraničního kapitálu do české ekonomiky.

### 3. Statistické metody

#### 3.1. Statistický experiment

Statistický experiment je důležitým nástrojem k získání souboru dat a jeho analýzy pro ověření fungování ekonomického modelu. Problematika ekonomického modelování zahrnuje velké množství různorodých aspektů, a proto se v této práci se zaměřujeme pouze na ty, které přímo nebo nepřímo souvisí s použitím statistických metod; zaměřujeme se zejména na statistickou analýzu dat týkajících se využívání obnovitelných zdrojů energie. Efektivní technologie, umožňující výrobu energie ze slunce (fotovoltaika a solární ohřev), je známá asi 30-35 let, využívání tohoto zdroje v masovém měřítku je efektivní od roku 1990. Ke konci roku 2008 tedy existují soubory dat týkající se výroby a prodeje fotovoltaických modulů, jakož i výroby a prodeje termálních kolektorů. Tato data jsou publikována ve statistických přehledech (EU, Německo, USA, Japonsko), v odborných periodikách [42-44] a na různých webových serverech [59,60]; statistickou analýzou těchto dat lze ověřit modelové představy o fungování trhu s obnovitelnými zdroji a samozřejmě též provést srovnání z hlediska celkové energetické bilance, do které vstupují zejména klasické energetické zdroje. Z výsledků analýzy lze usuzovat na efektivní modely fungování trhu v oblasti obnovitelných zdrojů energie; lze rovněž odvodit model instalace potřebného energetického výkonu obnovitelných k náhradě stanoveného procenta klasických zdrojů.

V uvažované energetické koncepci možné náhrady klasických zdrojů energie (fosilní paliva) obnovitelnými energetickými zdroji (fotovoltaické moduly pro přímou výrobu elektřiny ze slunce a termosolární kolektory pro ohřev teplé užitkové vody) patří velmi důležité místo domácnostem (byty, rodinné domy), neboť právě ony představují relevantní zákazníky pro odběr tzv. „zelené energie“. Instalace solárních termokolektorů a fotovoltaických panelů na střechách obytných domů (jak to vidíme ve vyspělých evropských státech, zejména v Německu, Francii, Itálii, Španělsku, ale též v Japonsku, Jižní Koreji a USA) může podstatně přispět ke zvyšování odběru energie získávané z ekologicky čistých zdrojů a tím i ke změně poměrů odběrů klasická versus obnovitelná energie. V ČR zatím data tohoto typu nejsou k dispozici, a proto jsme provedli vlastní statistická šetření na vzorku vybraných domácností v různých okresech a regionech. Získané statistické soubory

dat jsme analyzovali nejenom z hlediska popisné statistiky, ale především metodami vícerozměrné statistické analýzy.

## 3.2. Náhodný výběr

### 3.2.1. Teorie výběru a vážení

Výběrová šetření jsou založena na výběru vzorků lidí, vzorků ekonomických údajů, případně jiných položek (zde nazývaných **jednotky**) a to tak, aby statistické šetření umožnilo získat požadovanou informaci. Výběr vzorků je takto spojen s náhodným výběrem jistých jednotek ze souboru, který nazýváme **náhodný výběr**. Předpokládáme, že tento soubor představuje soubor jednotek, pro který hledáme informaci; to je to, co vytváří například **cílovou skupinu**; tato může být určena pevně nebo náhodně. Cílová skupina může být určena prioritně na základě selekce (**pevně určená velikost vzorku**) nebo v čase samotného „vybírání“ (**náhodně určená velikost vzorku**). Zde se omezíme na případ, kdy velikost cílové skupiny je pevně daná, což bývá nejčastějším případem.

Jako vhodný příklad lze uvést studii [11], která se zabývá statistickým šetřením vlivů škodlivých jevů na lidské zdraví (například vliv kouření na vznik onemocnění rakovinou plic) a pro náš případ tak vhodně ilustruje právě teorii statistického výběru. Výběrový soubor pevně dané velikosti lze popsat následovně: Předpokládejme, že  $Y_U = (y_1, \dots, y_N)$  je vektor hodnot  $y_k$  pro populaci  $U$  velikosti  $N$ . Hodnota  $y_k$  ze souboru  $Y_U$  může být počet cigaret vykouřených jednotlivcem  $k$  v průběhu daného dne. Obecně chceme znát hodnotu například úhrnu  $Y = \sum_{k=1}^N y_k$ , nebo odhad průměru  $\bar{Y} = Y / N$ . Známe-li velikost  $N$  cílové skupiny  $U$  (počet prvků), z  $Y$  můžeme určit  $\bar{Y}$ ;  $Y$  představuje celkový počet cigaret vykouřených jednotlivcem za jeden den, zatímco  $\bar{Y}$  představuje odhad průměru počtu cigaret vykouřených jednotlivcem.

Abychom odhadli úhrn  $Y$  (nebo průměr  $\bar{Y}$ ) pro skupinu  $U$ , vybereme skupinu jednotek  $s$  o velikosti  $n$  ze souboru  $\mathcal{S}$  všech vzorků  $s$  vybraných z  $U$  tak, aby platilo

$$p(s) \geq 0.$$

Funkce  $p(s)$  představuje pravděpodobnost výběru vzorku  $s$  mezi všemi vzorky z  $\Xi$ . Pro případ stejného rozsahu výběrových souborů, kde všechny možné mohou být vybrány se stejnou pravděpodobností, je  $p(s) = n!(N-n)!/N!$ .

Definujeme pravděpodobnost zahrnutí prvku  $k$  z cílové skupiny  $U$  vztahem

$$p_k = \sum_{s \ni k} p(s) , \quad (3.1)$$

ve kterém je suma (3.1) vytvořena součtem přes všechny prvky  $s$  ze souboru  $\Xi$ , které obsahují  $k$ . Předpokládáme, že  $\pi_k > 0$  pro všechny jednotky  $k$  z populace  $U$ , tj. že všechny jednotky  $k$  z populace  $U$  mají nenulovou pravděpodobnost, že budou zahrnuty. Například pro jednoduchý náhodný výběr dostáváme  $\pi_k = n/N$  pro  $k=1, \dots, N$ .

Pro každou jednotku  $k$  ze souboru  $s$  lze určit hodnotu zkoumané proměnné  $y_k$ . Lze odhadnout sumu  $Y$  pomocí tzv. Horvitz-Thompsonova estimátoru [21] :

$$\hat{Y}^{HT} = \sum_{k=1}^n \frac{y_k}{p_k} , \quad (3.2)$$

ve kterém je suma (3.2) vytvořena součtem přes všechny jednotky  $k$  vzorku  $s$ . Můžeme ukázat, že mezi estimátorem  $\hat{Y}^{HT}$  a  $Y$  platí vztah

$$E(\hat{Y}^{HT}) = \sum_{s \in \Xi} p(s) \hat{Y}_s^{HT} = Y . \quad (3.3)$$

Rovnice (3.3) je výpočet střední hodnoty pro Horvitz-Thompsonův [21] odhad  $\hat{Y}^{HT}$ . Vážené pravděpodobností výběru vzorku  $s$  se tedy rovnají skutečné hodnotě sumy  $Y$ . Zavedeme-li indikátor proměnné  $t_k$ , přičemž  $t_k = 1$  jestliže  $k \in s$ , a v ostatních případech  $t_k = 0$ , můžeme přepsat estimátor  $\hat{Y}^{HT}$  do tvaru

$$\hat{Y}^{HT} = \sum_{k=1}^n \frac{t_k}{p_k} y_k . \quad (3.4)$$

Navíc ještě poznamenejme, že

$$E(t_k) = 1 \cdot P(k \in s) + 0 \cdot P(k \notin s) = P(k \in s) . \quad (3.5)$$

Ze vztahů (3.4) a (3.5) můžeme pro Horvitz-Thompsonův estimátor odvodit následující vztah:

$$E(\hat{Y}^{HT}) = \sum_{k=1}^N \frac{E(t_k)}{p_k} y_k = \sum_{k=1}^N \frac{p_k}{p_k} y_k = \sum_{k=1}^N y_k = Y . \quad (3.6)$$

Vzorec pro rozptyl estimátoru  $\hat{Y}^{HT}$ , bereme-li v úvahu „výběr vzorkování“, lze psát ve tvaru

$$Var(\hat{Y}^{HT}) = \sum_{k=1}^N \sum_{k'=1}^N \frac{(p_{kk'} - p_k p_{k'})}{p_k p_{k'}} y_k y_{k'} \quad (3.7)$$

kde  $\pi_{kk'}$  reprezentuje společnou pravděpodobnost výběru jednotky  $k$  a jednotky  $k'$  [50].

Zavedeme-li váhu výběru  $d_k = 1/\pi_k$ , můžeme estimátor  $\hat{Y}^{HT}$  (vztah 3.2) přepsat jako

$$\hat{Y}^{HT} = \sum_{k=1}^n d_k y_k . \quad (3.8)$$

V teorii výběru je  $d_k$  převrácenou hodnotou pravděpodobnosti zahrnutí  $\pi_k$  jednotky  $k$  ze vzorku  $s$ . Váha výběru jednotky  $k$  odpovídá očekávanému počtu jednotek z populace  $U$ . Jako příklad uvedeme, že pokud existuje jedna ze čtyř možností ( $\pi_k = 1/4$ ) být částí výběru, bude mít váhu výběru rovnou 4, tedy můžeme říci, že tato jednotka ve vzorku reprezentuje průměrně čtyři jednotky zkoumané cílové skupiny. Je evidentní, že váha výběru  $d_k$  nemusí být pouze celé číslo.

Obecně lze definovat „váhu odhadu“ kterou přiřadíme jednotce  $k$  z výběru  $s$ . Tato váha vede k estimátoru

$$\hat{Y} = \sum_{k=1}^n w_k y_k , \quad (3.9)$$

jehož vlastnosti (například variance) závisí na konstrukci váhy odhadu  $w_k$ . V našich statistických šetřeních budeme používat váhy odhadu získané zobecněním metody nazvané sdílení vah [2].

### 3.2.2. Výběr skupin

Výběrové šetření lze rovněž provádět prostřednictvím výběru skupin dat nazývaných shluky. Výběr skupin se v praxi používá velmi často, a to zejména v případě rozměrných souborů dat. Tato technika výběru dat však nesouvisí s výběrem jednotlivých prvků, respektive vzorků „primárních“ jednotek PSU (Primary Sampling Units), ale je založena na výběru skupin jednotek nazvaných shluky. Jednotkami v tomto výběru jsou „sekundární“ shluky SSU (Secondary Sampling Units). Na „shlukovém výběru“ lze provádět šetření pro všechny SSU, které patří vybraným PSU. Když provádíme šetření pouze pro vybrané takzvané sub-vzorky z SSU s vybranými PSU, mluvíme o „dvojfázovém výběru“. Pro statistická šetření v oblasti sociálních výzkumů se tímto způsobem vybírají domácnosti, na nich se pak provádí statistické šetření, přičemž se šetří pouze soubory jedinců z těchto domácností. Domácnosti tedy vytvářejí shluky jednotek. Provádíme-li náhodný výběr domácností v celé ČR, je zřejmé, že zhruba čtyřmilionový soubor domácností lze podrobit přímému výběru: museli bychom mít k dispozici jejich úplný a aktuální seznam. To je však téměř vždy vyloučeno. Je proto vhodné rozdělit výběr na dva stupně: nejprve vybrat náhodně územní celky (kraje, okresy, města a obce) a uvnitř nich opět náhodně stanovený počet domácností. V případě našeho šetření ohledně spotřeby energií v domácnostech (podrobněji viz. kap. 5) je navíc účelné rozdělit soubor na rodinné domy a byty.

Pro ekonomická šetření se často vybírají podniky za účelem získání informací o jejich jednotlivých složkách, například pro jednotlivé závody, nebo naopak pro celá výrobní odvětví. Podniky jsou složeny z jednotlivých závodů, na kterých lze provádět různá statistická šetření. Cílem těchto šetření je získat ekonomicky důležité statistické údaje.

Pomocí shlukového výběru se statistické šetření významně redukuje ve smyslu velikosti zkoumaného souboru, což se samozřejmě promítá do nákladů vznikajících při sběru dat. Ve skutečnosti šetření pro celé domácnosti umožňují tazateli podstatně zredukovat počet cest za svými „objekty“ výzkumů ve srovnání s těmi, kdo provádí šetření stejného počtu jedinců ale v různých domácnostech. Tím shlukový výběr dovoluje získat výsledky na úrovni samotného shluku. Lze tedy například statisticky určit spotřebu energií šetřené domácnosti. Teorie shlukového výběrů je publikována ve všech knihách jako součást teorie výběrového šetření. Předpokládejme, že cílová skupina  $U$  sestává z  $N$  shluků kde každý shluk  $i$

obsahuje  $M_i$  jednotek (viz ilustraci na obr. 3.1). Vybereme vzorek s obsahující  $n$  shluků v cílové skupině  $U$ . Předpokládáme, že  $\pi_i$  představuje pravděpodobnost výběru shluku  $i$ , přičemž  $\pi_i > 0$  pro všechny shluky  $i \in U$ . Jelikož každý shluk  $i$  cílové skupiny  $U$  obsahuje  $M_i$  jednotek, máme ve skutečnosti sumu  $M = \sum_{i=1}^N M_i$  jednotek v cílové skupině. Každý prvek  $k$  výběrové skupiny  $i$  má tedy stejnou pravděpodobnost výběru jako výběrová skupina, tj.  $\pi_{ik} = \pi_i$ .

Ve vybrané skupině hledáme celkový odhad  $Y = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{M_i} y_{ik}$  pro charakteristiku  $y$ . Uvažujeme-li Horvitz-Thompsonův estimátor (3.2), můžeme použít estimátor  $\hat{Y}^{CLUS, HT}$  daný vztahem

$$\hat{Y}^{CLUS, HT} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{p_i} \quad (3.10)$$

kde  $Y_i = \sum_{k=1}^{M_i} y_{ik}$ .

Horní index  $CLUS$  označuje výběrovou skupinu.

Variance  $\hat{Y}^{CLUS, HT}$  je tedy dána jako

$$Var(\hat{Y}^{CLUS, HT}) = \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N \frac{(p_{i'} - p_i p_{i'})}{p_i p_{i'}} Y_i Y_{i'} \quad (3.11)$$

Estimátor (3.10) můžeme přepsat do tvaru

$$\hat{Y}^{CLUS, HT} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{p_{ik}} \sum_{k=1}^{M_i} y_{ik} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{M_i} \frac{y_{ik}}{p_{ik}} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{M_i} d_{ik} y_{ik} \quad (3.12)$$

v němž je  $d_{ik} = 1/\pi_{ik}$ .

Estimátor (3.10) lze přepsat do tvaru

$$\hat{Y}^{CLUS, HT} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{M_i} w_{ik}^{CLUS} y_{ik} \quad (3.13)$$

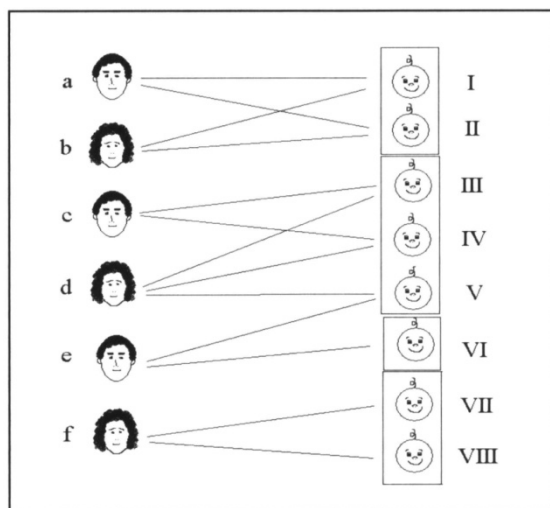
Vlastnosti tohoto estimátoru závisí na konstrukci váhy odhadu  $w_{ik}$ .

### 3.2.3. Nepřímý výběr

Abychom prostřednictvím pravděpodobnostního výběru mohli vybrat potřebné vzorky pro sociologický anebo ekonomický statistický průzkum, je užitečné

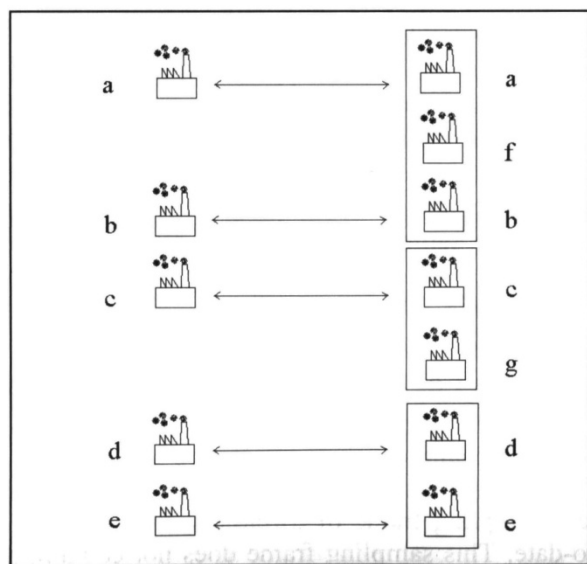
mít oporu výběru Bohužel se často stává, že žádný takový soubor, který by přímo odpovídal šetřené cílové populaci, není: v tom případě můžeme vybrat vzorek, který má nepřímý vztah k cílové populaci. Můžeme tedy mluvit o dvou populacích  $U^A$  a  $U^B$ , které jsou ve vzájemném vztahu. Přejeme-li si provést šetření na výběrovém souboru  $U^B$ , a máme k dispozici pouze výběrový soubor  $U^A$ , můžeme tedy provést šetření na vzorku  $U^A$  a odhadnout vzorek  $U^B$  v případě použití existujícího vztahu mezi těmito dvěma populacemi. To je princip metody zvané „nepřímý výběr“.

Jako vhodný příklad uvádíme situaci, kdy se odhad týká skupiny dětí (jednotky šetření), patřících rodinám (shluky šetření), ale jako výběrové měřítko máme pouze soubor jmen jejich rodičů. Cílovou populací pro naše šetření je skupina dětí, ale musíme nejdříve vybrat vzorek rodičů [37, 38].



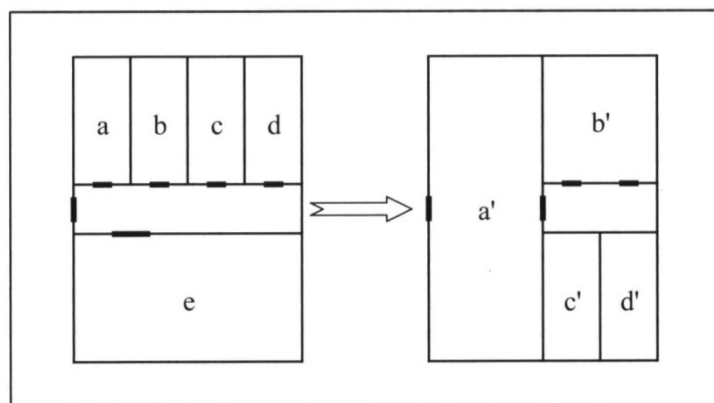
Obr. 3.1 Nepřímý výběr – ilustrace „uskupení rodin“

Tento výběr ilustrujeme na obr. 3.1, na kterém jsou rodiny vyznačeny čtverečky a obdélníky, přičemž děti mohou pocházet z různých „uskupení“. Jiným příkladem použití nepřímého výběru může být situace týkající se řízení šetření různých částí podniků (odštěpené nebo pobočné závody v tomto případě představují výběrové skupiny), a disponujeme pouze neúplným výběrovým souborem týkajícím se pouze částí těchto podniků. Pro každý pobočný závod podniku z tohoto výběrového souboru chceme mít vzorek pobočního závodu (jednotky), který patří stejnému podniku. Ty pobočné závody, které se nevyskytují v tomto výběru, musí být tedy zastoupeny těmi závody, jež byly do tohoto výběru zahrnuty.



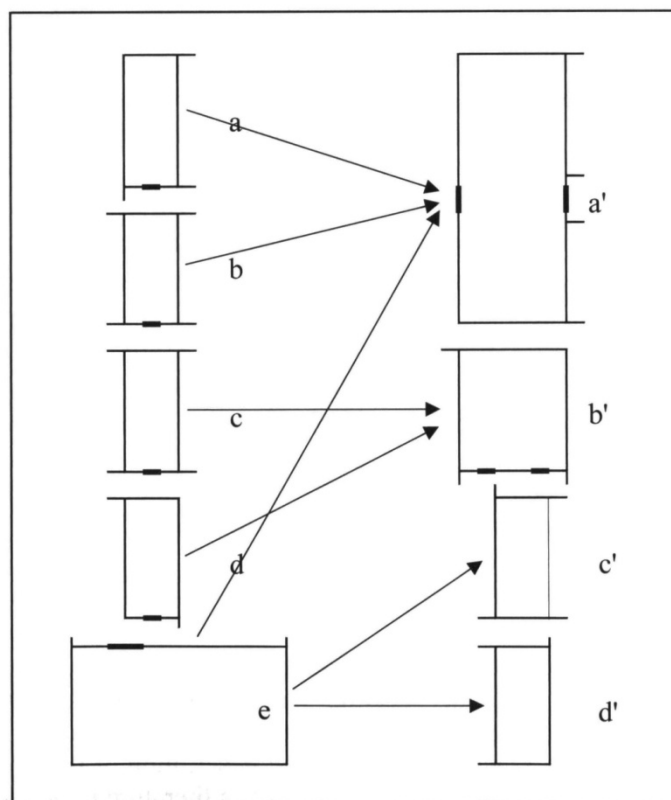
Obr. 3.2 Nepřímý výběr – ilustrace „uskupení podniků“

Tento případ je znázorněn na obr. 3.2 . Zde vidíme, že pobočné závody *a*, *b*, *c*, *d*, a *e* jsou součástí výběru, zatímco závody *f* a *g* nikoli. Třetím příkladem náhodného výběru je situace týkající se statistického šetření na vzorku lidí (jednotky výběru) kteří žijí v domácnostech (shluky výběru). Pro tento případ máme sice výběr obydlí, ten ale již není aktuální; neobsahuje totiž informaci o provedených změnách (například renovacích), které změnilly prosté obytné domy na luxusní apartmány.



Obr. 3.3 Nepřímý výběr - ilustrace „shluků výběrů“

Příkladem renovace tohoto typu je situace zobrazená na obr. 3.3 . Poznamenáváme, že obydlí *a*, *b*, *c*, *d*, a *e* byly rekonstrukcí transformovány na *a'*, *b'*, *c'* a *d'*. Při výběru z tohoto vzorku bydlení musíme mít ještě vztah mezi starým a novým obytným zařízením. Tato situace je znázorněna na obr. 3.4 .



Obr. 3.4 Nepřímý výběr – ilustrace „transformace“

#### 3.2.4. Metoda sdílených vážených průměrů - GWSM

Odhad střední hodnoty cílové populace  $U^B$  skupiny, která je ve vztahu s jinou populací  $U^A$ , je důležitým prvkem analýzy zejména v případě, že obě populace nejsou identické. Problém spočívá ve složitosti určení pravděpodobnosti výběru neboli odhadu váhy šetřených jednotek cílové populace.

Vezmeme-li v úvahu příklad rodin znázorněný na obr. 3.1, může být obtížné přiřadit pravděpodobnost výběru pro každé dítě z vybrané rodiny (neboli skupiny). Ve skutečnosti bychom mohli vybrat rodinu skrze jednoho nebo více rodičů, ale abychom určili pravděpodobnost výběru rodiny a tudíž i dítěte, musíme znát pravděpodobnost výběru každého rodiče, přičemž je jedno, je-li jednotka ze zkoumaného souboru nebo nikoliv (jedna rodina může mít děti z různých manželství). V praxi se takový případ vícenásobné konstrukce může vyskytnout. V případě vybraných pobočných závodů (nebo též shluků pobočných závodů) daného podniku (viz obr. 3.3) je problém asociovaný s odhadem statistických vah nových závodů ( $f$  a  $g$ ) cílové skupiny. Řešení problému spojeného s odhadem významnosti daného prvku (jednotky) představuje zobecněná metoda sdílených vah

(GWSM), která vytváří váhu odhadu pro každou sledovanou jednotku cílové populace  $U^B$ . Tento odhad je v zásadě založen na určení vážených průměrů populace  $U^A$ , z které se provádí náhodný výběr. Tuto metodu vyvinul P. Lavallée již v roce 1995 [37] v souvislosti se statistickým šetřením domácností v Kanadě [52]. Metoda je zobecněním sdílení vážených průměrů [16] a lze ji chápat jako zobecnění sítového výběru, jakož i adaptivního shlukového výběru [53].

### 3.2.5. Použití dvojstupňové shlukové analýzy v programu SPSS

V energetické koncepci zájímají důležité místo domácnosti (byty a rodinné domy), které spotřebovávají elektrickou a tepelnou energii. Z tohoto důvodu je žádoucí provést šetření o jejich energetické spotřebě. V rámci provedeného šetření jsme získali údaje o odběrech elektrické energie a plynu, na relativně velkém souboru, který analyzujeme (viz. kap. 5); zde uvádíme příklad aplikace dvojstupňové shlukové analýzy s využitím statistického programu SPSS [40].

Uvažujme soubor, který obsahuje data o spotřebě elektrické energie (v kWh) a zemního plynu (v  $m^3$ ) za rok 2007 od 100 vybraných domácností v deseti regionech ČR: okr. Benešov, okr. Praha-východ, Praha 5-Smíchov, Praha 5-Zličín, Praha 6-Břevnov, Olomouc-město, Olomouc-venkov, Brno-město, Brno-venkov a Karlovy Vary. Souhrnná data jsou uvedena v příloze B, která obsahuje tyto proměnné:

- spotřebu plynu;
- spotřebu elektrické energie v režimu D49, tedy denní odběr a noční odběr;
- celkovou spotřebu elektřiny, která představuje součet denní a noční spotřeby, v našem příkladu jí proto neuvažujeme;
- objem obytného prostoru;

a pořadové proměnné:

- místo;
- pořadí;
- počet obyvatel dané domácnosti;
- instalace venkovního bazénu, pouze alternativní data typu ano-ne.

V programu SPSS [40] verze 16 zvolíme dvoustupňovou shlukovou analýzu a jako proměnné vybereme: *Místo*, *Venkovní bazén* a *Počet obyvatel*; jako spojitě potom *Spotřebu plynu*, *Spotřebu noční elektřiny*, *Spotřebu denní elektřiny* a *Objem*.

Pro měření vzdálenosti použijeme logaritmické měřítko a pro kritéria shlukování Schwarz-Bayesovo kritérium, určení počtu shluků ponecháme na volbě automaticky, protože jsme nevyslovili žádnou hypotézu o tom, kolik shluků může tento soubor obsahovat nebo nemáme požadavek na počet shluků, které chceme získat. V možnosti voleb grafického zobrazení „Plots“ vybereme grafy shlukového podílu, výsečový graf shluků a pořadí důležitosti proměnných.

Výsledky dvoustupňové analýzy prezentujeme v Tab. 3.1 až 3 a interpretujeme následovně: Tab. 3.1 zobrazuje prvotní automatické rozdělení do 5 shluků:

Tab. 3.1 Auto-shlukování

| Auto-shlukování |                                  |                         |                                    |                                            |
|-----------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|
| Počet shluků    | Schwarz-Bayesovo kritérium (BIC) | Změna BIC <sup>*)</sup> | Ukazatel Změny BIC <sup>**) </sup> | Ukazatel změny vzdálenosti <sup>***)</sup> |
| 1               | 1340,817                         |                         |                                    |                                            |
| 2               | 1262,605                         | -78,212                 | 1,000                              | 1,734                                      |
| 3               | 1266,237                         | 3,631                   | -,046                              | 1,133                                      |
| 4               | 1282,935                         | 16,699                  | -,214                              | 1,210                                      |
| 5               | 1316,725                         | 33,790                  | -,432                              | 1,203                                      |

V této tabulce změna BIC označená <sup>\*)</sup> znamená změny z předchozího počtu shluků v tabulce, ukazatel změny BIC označený <sup>\*\*)</sup>  znamená relativní změnu ve srovnání s dvoushlukovým řešením a ukazatel změny vzdálenosti označený <sup>\*\*\*)</sup> znamená změnu poměru vzdáleností konkrétního počtu shluků ve srovnání s předchozím počtem shluků. Z této tabulky je zřejmé, že výše uvedená data tvoří dva shluky (tab. 3.2):

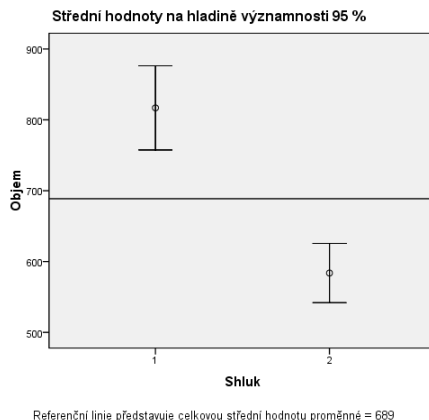
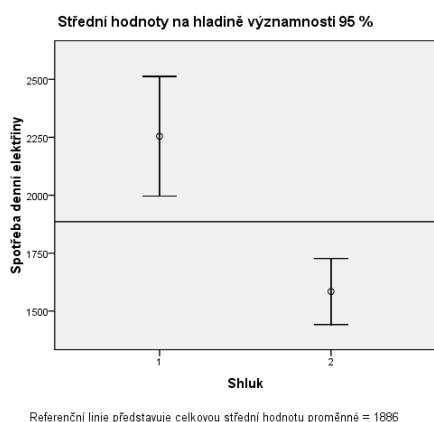
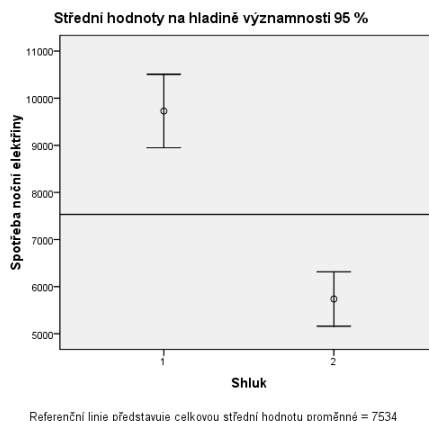
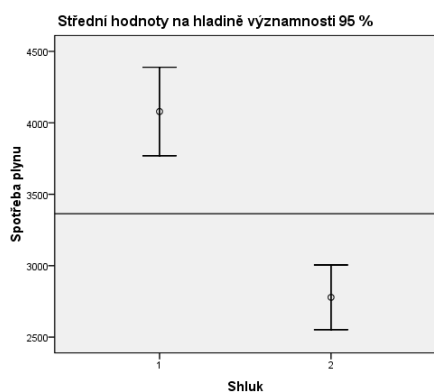
Tab. 3.2 Rozdělení shluků

| Rozdělení shluků |           |                 |             |          |
|------------------|-----------|-----------------|-------------|----------|
|                  |           | N - počet prvků | % Kombinace | % Celkem |
| Shluk            | 1         | 45              | 45,0%       | 45,0%    |
|                  | 2         | 55              | 55,0%       | 55,0%    |
|                  | Kombinace | 100             | 100,0%      | 100,0%   |
| Celkem           |           | 100             |             | 100,0%   |

Těžiště jednotlivých spojitých proměnných, konkrétně jejich střední hodnoty a směrodatné odchylky, prezentujeme v tab. 3.3:

Tab. 3.3 Těžiště

| Těžiště   |                                  |                     |                                |                     |                                |                     |                         |                     |
|-----------|----------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| Shluk     | Spotřeba plynu [m <sup>3</sup> ] |                     | Spotřeba noční elektřiny [kWh] |                     | Spotřeba denní elektřiny [kWh] |                     | Objem [m <sup>3</sup> ] |                     |
|           | Střední hodnota                  | Směrodatná odchylka | Střední hodnota                | Směrodatná odchylka | Střední hodnota                | Směrodatná odchylka | Střední hodnota         | Směrodatná odchylka |
| 1         | 4078,84                          | 895,753             | 9727,56                        | 2252,636            | 2254,47                        | 745,683             | 816,93                  | 171,740             |
| 2         | 2778,51                          | 729,380             | 5738,98                        | 1855,115            | 1584,60                        | 458,365             | 583,76                  | 134,351             |
| Kombinace | 3363,66                          | 1034,170            | 7533,84                        | 2847,738            | 1886,04                        | 688,411             | 688,69                  | 191,171             |



Obr. 3.5 Střední hodnoty včetně 95%-ní hladiny významnosti

Závěry z této dvou stupňové shlukové analýzy lze interpretovat takto:

- Uvedený soubor dat tvoří dva shluky prvků
- Shluk číslo 1 má tyto základní charakteristiky:
  - o U pořadových proměnných jde o domácnosti, které žijí většinou na venkově, mají bazén a větší počet členů domácnosti
  - o U spojitých proměnných jde o domácnosti, které mají celkově vyšší spotřebu plynu, elektřiny a větší objem obytných prostor

- Shluk číslo 2 má tyto základní charakteristiky:
  - o U pořadových proměnných jde o domácnosti, které žijí většinou ve městech, nemají bazén a mají menší počet členů domácnosti
  - o U spojitých proměnných jde o domácnosti, které mají celkově nižší spotřebu plynu, elektřiny a menší objem obytných prostor

Vzhledem k malé velikosti souboru, obsahujícím pouze 100 jednotek a sedm proměnných (tři pořadových a čtyř spojitých) je případné praktické využití této analýzy obtížné, ale plně vyhovuje pro názornost tohoto příkladu.

### 3.3. Vícerozměrná statistická analýza

V uvažované energetické koncepci náhrady klasických zdrojů energie (elektřina a plyn) za obnovitelné energetické zdroje (například fotovoltaické moduly pro přímou výrobu elektřiny ze slunce a termosolární kolektory pro ohřev teplé užitkové vody) patří velmi důležité místo právě domácnostem, které spotřebovávají jak elektřinu tak i plyn (vytápění a ohřev teplé užitkové vody) z klasických energetických zdrojů. Z tohoto důvodu je třeba zejména provádět statistická šetření o spotřebě elektrické energie a plynu v domácnostech (rodinné domy, byty), neboť právě domácnosti představují relevantní zákazníky odběru tzv. ekologické nebo též „zelené“ energie. V ČR taková data nejsou k dispozici, proto jsme se rozhodli provést statistické šetření na vzorku vybraných domácností v různých regionech a okresech. Získali jsme data o odběru elektřiny a plynu na poměrně velkém souboru a tyto soubory dat jsme analyzovali z hlediska popisné statistické analýzy. Nicméně, tato jednoduchá analýza není dostačující a to zejména proto, že je třeba zkoumat vícerozměrné statistické soubory a korelaci, případně interakci příslušných proměnných. Je tedy žádoucí efektivně využít metod vícerozměrné statistické analýzy na získaném souboru dat z korektně připraveného statistického experimentu a tyto aplikovat na získaná data, provést analýzu a pokusit se o interpretaci výsledků z hlediska výše uvedeného.

Jak zde již bylo uvedeno, domácnosti v ČR představují důležitý zdroj odběru jak elektrické energie tak plynu pro vytápění a ohřev teplé užitkové vody. Tyto klasické zdroje lze již nyní částečně nebo dokonce úplně nahradit fotovoltaickými moduly, které představují moderní ekologicky čistý zdroj elektřiny získávané přímou přeměnou slunečního záření na elektřinu a termosolárními kolektory pro ohřev teplé

užitkové vody využívající energie ze slunce. Jsou známy ceny těchto zařízení, jejich účinnosti konverze a možné energetické výkony pro danou instalaci, lze tedy spočítat energetický instalovaný výkon potřebný pro úplnou energetickou saturaci daného objektu. Nejsou však dostupná podrobná data o spotřebě elektřiny a plynu v jednotlivých domácnostech, takže chybí možnost srovnání, případně komplementace. Tato data a jejich statistická analýza jsou ovšem pro tento typ zkoumání relevantní. Proto jsme si za jeden z cílů tohoto zkoumání stanovili provést **statistické šetření na vybraném souboru rodinných domů a bytů v různých regionech a okresech ČR a provést průzkumovou analýzu získaných statistických dat.**

Při aplikaci vícerozměrných statistických metod je nutné rozlišit **úplná a výběrová** zjišťování, což je podrobně popsáno v pracích Hebáka a spol. [20] . V našem případě jsme se ovšem nemohli zabývat úplným výběrovým zjišťováním, jednalo se o neúplná pozorování na vzorku vybraných domácností, které souhlasily s poskytováním příslušných údajů o spotřebě energií. Jednou z moderních metod splňujících cíle tohoto typu statistického zjišťování může být **shluková analýza**, která je vhodná pro relativně velké soubory dat (více než 250 objektů) s vysokou dimenzionalitou (je-li objekt charakterizován více než 16-ti proměnnými). Je evidentní, že takto rozsáhlá analýza dat se neobejde bez efektivního zpracování: pro shlukovou analýzu vícerozměrných dat existují efektivní algoritmy dostupné v softwarových nástrojích a dobře popsané v odborné literatuře [48]. Při vytváření datového souboru se využívá generátoru náhodných čísel z vícerozměrného náhodného rozdělení a standardní shluková analýza vícerozměrných dat v systémovém programu R [41] , jenž nabízí zajímavý výstup, což je graf obrysů shluků (Silhouette Plot) a charakteristiky s ním spojené. Systém R je poměrně univerzálním softwarovým nástrojem a prostředím pro zpracování dat a jejich analýzu, pro statistické výpočty a tvorbu grafických výstupů. Systém R dále obsahuje předdefinované funkce, které pokrývají různé statistické postupy, například pro lineární modely, nelineární regresi, analýzu časových řad, parametrické a neparametrické testy, podporu importu a exportu statistických dat do různých jiných programových souborů (MiniTab, SAS, SYSTAT, dBase). Při úplných zjišťováních je často nutné segmentovat data dle vybraných cílů šetření (například banky a finanční instituce s velkým počtem objektů-zákazníků segmentují data ve smyslu specifického rozčlenění) a tato segmentace dat patří mezi základní nástroje

marketingového šetření. Segmentační modely nepřinášejí rychlé a dobře měřitelné výsledky, avšak jsou nezbytné pro efektivní vykonávání činností ve vztahu se zákazníky, zejména ve společnostech s velkým počtem klientů, tj. v bankách a finančních institucích (tyto společnosti disponují rozsáhlou datovou základnou, v podstatě velkorozměrným datovým skladem, v němž jsou evidovány charakteristiky klientů, jejich chování ke společnosti a samozřejmě též časové závislosti těchto charakteristik). K tvorbě segmentačních modelů lze efektivně využít klasického aparátu shlukové analýzy [22]. Je třeba poznamenat, že shluková analýza CRM se liší od tzv. „Fuzzy shlukové analýzy“ [41,48], kdy se při analýze R softwarovým systémem zjišťují „nepodobnosti“ z  $n(n-1)/2$  složkového vektoru dvojic případů pro zadaný zdrojový datový soubor.

V našem případě zkoumání se zajímáme o  $p$  statistických znaků u velkého statistického souboru dat, jakým je spotřeba energií (elektřiny a plynu) u domácností (rodinné domy a byty) v ČR. Potřebné poznatky můžeme získat statistickou analýzou, opírající se o  $n$   $p$ -rozměrných pozorování, které tvoří v daném případě tzv. výběrový soubor. V našem statistickém šetření tedy musíme provádět test normality rozdělení. V případě normálního rozdělení budeme moci  $p$ -rozměrné pozorování  $x_i$  považovat za realizaci  $p$ -rozměrné náhodné veličiny přičemž:

- náhodné veličiny  $x_1, x_2, \dots, x_N$  jsou nezávislé,
- rozdělení náhodných veličin  $x_1, x_2, \dots, x_N$  jsou statisticky identická.

Potom máme k dispozici prostý náhodný výběr [15] . O metodách a problémech ověřování normality podrobně pojednává práce [20] .

V našem statistickém šetření jsme získali data o spotřebě elektrické energie (v kWh) a (zemního) plynu (v m<sup>3</sup>) za rok 2007 od 100 vybraných domácností v 10-ti regionech ČR a 116 bytech ve dvou nezávislých bytových komplexech (38 bytů a 78 bytů); viz příslušné tabulky v příloze této práce.

U rodinných domů byly sledovány tyto statistické údaje:

- spotřeba plynu,
- spotřeba elektrické energie v režimu D49, tedy denní odběr a noční odběr, u rodinných domů
- celková spotřeba elektřiny,
- objem obytného prostoru rodinných domů
- počet obyvatel dané domácnosti a

- instalace venkovního bazénu (pouze alternativní data typu ano-ne).

Spotřeba plynu, spotřeba elektřiny (noční odběr), spotřeba elektřiny (denní odběr) a celková spotřeba elektřiny vztažené na jednotku ( $1\text{m}^3$ ) obytného prostoru jsou uvedeny v příslušných tabulkách v příloze této práce.

U bytů byly sledovány následující statistické údaje:

- spotřeba plynu
- spotřeba elektrické energie v režimu D02, tedy pouze denní odběr
- užitná plocha bytu
- počet obyvatel dané domácnosti

V rámci časové analýzy byly u jedné z domácností rovněž sledovány měsíční spotřeby elektřiny a zemního plynu v jednotlivých měsících za posledních pět let, u deseti vybraných domácností byly sledovány časové závislosti spotřeby elektrické energie a zemního plynu za posledních pět let (od roku 2003); údaje jsou uvedeny v tabulkách v příloze této práce.

V našem případě se jedná o náhodný **výběrový soubor** dat; matice dat však není natolik rozsáhlá, aby bylo nutno užít tak složitého statistického aparátu, jaký představuje zde již zmíněná **shluková analýza** (vhodná zejména ke zpracování velkého počtu dat například v bankovním sektoru nebo v oblasti marketingu), a její případné modifikace. Při zpracování námi získaného souboru dat je třeba především ověřit jejich “správnost”, tedy vyloučit možná **vybočující, mylná** anebo **odlehlá pozorování**, která by mohla zkreslovat určitým způsobem výsledky analýzy i jejich interpretaci. O metodách eliminace odlehlých pozorování pojednává odst. 3.3.1 této kapitoly. Dále je třeba ověřit, zda zkoumané náhodné veličiny mají **normální rozdělení**, aby s nimi bylo možno použít analýzu v rámci vícerozměrných statistických metod. O relevantních metodách zkoumání normality ( $\chi^2$  test dobré shody, výběrová distribuční funkce, Shapirův-Wilkův test, grafické posouzení) vícerozměrných dat se zmiňujeme v odst. 3.3.2. Jedním z hlavních cílů šetření má být zjištění o **interakci zkoumaných veličin**, tedy zda lze prokázat vzájemnou **korelaci** dvou různých režimů odběrů (například “noční” a “denní” odběr elektřiny) anebo zda-li existuje závislost odběru plynu na celkovém odběru elektřiny. Korelací dat se zabýváme v odst. 3.3.3.

### 3.3.1. Eliminace odlehlých pozorování

Vlastnímu zpracování dat obvykle předchází kontrola úplnosti a správnosti získaných údajů. Jsou to důležité operace, jejichž korektní provedení je nezbytnou podmínkou úspěšnosti aplikace statistických metod. Důležitým problémem je rozhodnutí, která pozorování nejsou konzistentní s ostatními a nemusí odpovídat předpokladu o normalitě pravděpodobnostního rozdělení náhodného výběru. Některé údaje mohou být přímo **nevěrohodné** (nesprávný „odečet“ statistických údajů), **chybné** (různé chyby při získávání dat), extrémně **vybočující** nebo **odlehlá** („outliers“). Dále budeme mluvit pouze o **odlehlých pozorováních** a popíšeme metody, jejichž pomocí je lze v souboru obecných dat vyhledat a určit na základě všeobecně známých kritérií.

Základními oblastmi průzkumové analýzy se zabývá práce [39], v níž se mimo jiné poukazuje na obtíže související s identifikací odlehlých pozorování. Nezabývá se robustními postupy, ale za vybočující považuje taková data, která se od ostatních nějakým způsobem liší a ovlivňují hodnoty výběrových charakteristik (zejména momentových), přičemž dochází k systematickým zkreslením. Vyhledávání vybočujících pozorování má dvě komplikace: maskování a zvětšování. Při maskování dochází k tomu, že odlehlé pozorování se nejeví odlehlým v blízkosti dalšího odlehlého pozorování, které jeho význam zmenšuje, zatímco při zvětšování dochází k tomu, že značně odlehlé pozorování ovlivní nejbližší správné pozorování tak, že se jeví jako odlehlé. Podle [20]: Test statistické hypotézy  $H: X \sim R(\theta)$ , že náhodný výběr pochází z rozdělení  $R$  s parametry  $\theta$  úzce souvisí s existencí vybočujících pozorování. Alternativní hypotéza ve tvaru  $A: x \sim R(\theta)(1 - \lambda) + x \sim R_A(\theta)\lambda$ , kde malý podíl  $\lambda$  prvků výběru pochází z jiného rozdělení  $R_A$ , úzce souvisí s použitím robustních odhadů (následující odstavce této kapitoly). Většina používaných testů odlehlých pozorování vychází z alternativní hypotézy, která říká, že část výběru (odlehlá vybočující pozorování) pochází sice z rozdělení  $R$ , ale liší se parametry rozdělení: střední hodnotou a variačním rozpětím. Jednotlivé postupy se pak pro dané  $R$  liší podle toho, zda se při odlehlých pozorováních předpokládá existence

- 1) jednoho nebo dvou odlehlých pozorování
- 2) známého počtu  $K$  odlehlých pozorování
- 3) neznámého počtu  $K$  odlehlých pozorování

a dále podle způsobu určení testového kritéria z dalších hledisek.

Nejjednodušší postup při vyhledávání odlehlých pozorování v datech představující náhodný výběr  $p$ -rozměrného normálního rozdělení  $N_p(\mu, \sigma)$  představuje určení tzv. Mahalanobisovy míry [20], definované vztahem

$$A_i^2 = (x_i - \mu)^T \sigma^{-1} (x_i - \mu) \quad (3.14)$$

Protože neznáme parametry rozdělení, nahradíme je vhodnými odhady a použijeme výběrovou Mahalanobisovou vzdálenost

$$D_i^2 = (x_i - \bar{x})^T \sigma^{-1} (x_i - \bar{x}) \quad (3.15)$$

Funkce této statistiky

$$F_2 = (n-p)nD_i^2 / [p(n^2 - 1)] \quad (3.16)$$

má za daných podmínek *rozdělení*  $F(p, n-p)$ .

Postupujeme tedy tak, že pro zbývajících  $(n-1)$  pozorování vypočteme vektor průměrů  $\bar{X}_{-i}$  a kovarianční matici  $S_{-i}$  (tedy bez  $i$ -tého řádku datové matice  $X$ ), výsledky dosadíme spolu s daným vektorem  $x_i$  do (3.15) a (3.16) a vypočtenou hodnotu  $f_{2i}$  porovnáme s kvantilem  $f_{1-\alpha}$  rozdělení  $F$  odpovídajícím předem zvolené pravděpodobnosti  $\alpha$ . Je-li  $f_{2i} > f_{1-\alpha}$ , označíme vektor  $x_i$  za odlehlé pozorování.

### 3.3.2. Zkoumání normality

Testy zkoumání normality jsou všeobecně známé [15,20], zde se omezíme jenom na základní definice a stručný popis vzhledem k tomu že na použití se odvoláváme v kapitole 5, ve které se zabýváme naším šetřením. Programový soubor STATGRAPHICS [3] nabízí možnost testování normality daného výběru. Z vícerozměrné normality pak vyplývá normalita všech jednotlivých marginálních rozdělení. V našich případech jde o normální Gaussovo rozdělení popsané vztahem

$$y = f(x) = \frac{1}{s \sqrt{2p}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2s^2}} \quad (3.17)$$

Ve kterém je  $\mu$  střední hodnota a  $\sigma$  střední kvadratická chyba.

Ověřování jednorozměrné i vícerozměrné normality lze provést různými způsoby. Nejznámější z testů normality jsou  $\chi^2$  test dobré shody, jenž je nejčastěji používaným testem shody empirických a teoretických hodnot, dále *Kolmogorovova-Smirnovův* test normality za pomoci empirické funkce a programový systém STATGRAPHICS též umožňuje provést *Shapiro-Wilkův* test. Další testy normality, zejména testy *Filibenův* a *d'Agostinův*, jsou příliš specifické pro naše zkoumání, zmíníme se zde však o testech normality vztahujících se k šikmosti a špičatosti rozložení [3] (tyto testy jsou totiž naprogramovány a počítány v naší verzi programového kódu STATGRAPHICS).

### $\chi^2$ test dobré shody

$\chi^2$  test dobré shody je jedním z nejstarších a nejpoužívanějších statistických testů, který ověřuje shodu předpokládaného rozdělení s empirickým rozdělením. Testuje se hypotéza  $H: \pi_k = \pi_{0,k}$  kde  $\pi_k$  jsou pravděpodobnosti hodnot náhodné veličiny  $\chi$  a  $\pi_{0,k}$  jsou předpokládané hodnoty těchto pravděpodobností. Je-li splněn předpoklad, že suma

$$\sum_{k=1}^K p_k = \sum_{k=1}^K p_{0,k} = 1 \quad (3.18)$$

testovaná hypotéza plně specifikuje model rozdělení. Testovaná hypotéza  $H$  předpokládá plně specifikovaný typ rozdělení veličiny  $\chi$ . Po provedení náhodného výběru o rozsahu  $n$  je každé pozorování zařazeno do jedné z uvažovaných  $K$  tříd. Získané četnosti  $n$  jednotlivých tříd je možné interpretovat jako hodnoty náhodných veličin  $\chi$ .

Častým případem je, že hypotéza  $H$  specifikuje určitý typ pravděpodobnostního rozdělení. V případech, kdy předpokládané rozdělení a tedy i  $\pi_k$  závisí na  $M$  neznámých parametrech rozdělení  $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_M$ , použije se kritérium:

$$\sum_{k=1}^K \frac{(n_k - np_k)^2}{np_k} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^K \frac{n_k^2}{p_k} - n, \quad (3.19)$$

kde odhady pravděpodobnosti  $\pi_k$  se stanoví modifikovanou metodou  $\chi^2$  minima, při níž se odhady parametrů najdou řešením rovnic

$$\sum_{k=1}^K \frac{n_k}{p_k} \frac{\partial p_k}{\partial q_m} = 0, m = 1, 2, \dots, M \quad (3.20)$$

### **Výběrová distribuční funkce a Kolmogorovův-Smirnovův test**

Alternativou k  $\chi^2$  testu dobré shody je tzv. Kolmogorovův-Smirnovův test. Testovaným kritériem v tomto testu je maximální rozdíl mezi výběrovou distribuční funkcí  $F_n(x)$  a teoretickou predikcí  $F_T(x)$ , přičemž hodnoty výběrové funkce určujeme jako kumulativní četnosti ve výběru [20]. Maximum hledáme v celém oboru hodnot. Předností tohoto testu je ve srovnání s  $\chi^2$  testem jeho větší síla pro relativně malý počet experimentálních bodů (údajů).

Hodnoty výběrové funkce lze určit vztahem

$$F_n(x) = 1/n \quad (3.21)$$

Pro uspořádané hodnoty  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ , je  $F_n(x) = 0$  a pro  $x \geq x_n$  je  $F_n(x) = 1$ ; testovým kritériem je veličina

$$D(n) = \max |F_n(x) - F_T(x)| \quad (3.22)$$

Hodnoty výběrové distribuční funkce počítá program STATGRAPHICS [3], který rovněž kreslí graf obou distribučních funkcí a něm určuje hodnotu  $x$ , pro kterou je největší rozdíl mezi  $F_n(x)$  a  $F_T(x)$ .

### **Shapirův-Wilkův test**

Testují se empirická data a porovnávají se s teoretickými. Má-li veličina  $X$  normální rozdělení, měly by ležet body určené hodnotami  $x_{(i)}$  a kvantily  $q_{(i)} = F^{-1}(i/n)$  přibližně na přímce procházející počátkem a svírající úhel  $45^\circ$  s oběma osami. Regresní koeficient (směrnice přímky) mezi  $x_{(i)}$  a  $q_{(i)}$  by měl být blízký jedné. Pro rozsah relativně malého výběru lze testové kritérium vyjádřit vztahem

$$SW = [\sum a_i x_{(i)}]^2 / Q(x) \quad (3.23)$$

a v tomto tvaru jej i počítá program STATGRAPHICS [3].

### **Grafické posouzení vícerozměrné normality**

K prvotnímu posouzení normality daného souboru může být někdy užitečné sestavit následující grafy:

- a) histogram rozdělení četností
- b) graf výběrové distribuční funkce
- c) q-q diagramy (zobrazující závislosti výběrových a normovaných kvantilů),

což umožňují všechny programové statistické programy včetně programu STATGRAPHICS [3]. Jedná se pouze o optické posouzení normality, které může tím pádem být značně subjektivní.

Tento způsob zkoumání normality lze pochopitelně rozšířit na vícerozměrný případ. Obvykle stačí posoudit jednotlivé páry dat příslušejících daným proměnným, takže lze sestavit *diagram*  $\chi^2$ , umožňující pozorovat soulad rozložení bodů na přímce svírající úhel  $45^\circ$  v souřadnicích  $D^2$  (vodorovná osa) a kvantil  $q$  (svislá osa), přičemž  $D^2$  je Mahalanobisova vzdálenost definovaná vztahem (3.15).

### **3.3.3. Regresní a korelační analýza**

V tomto odstavci se budeme zabývat vzájemnou závislostí zkoumaných dat. K tomu nám budou sloužit metody regresní a korelační analýzy. Tyto metody jsou podrobně a důkladně popsány v literatuře (Hebák a kol. [20] , Zvára [62] ). Zde uvedeme pouze relevantní definice.

Budeme pracovat s regresním modelem v obvyklém tvaru

$$Y = f(x) + \varepsilon = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x + \dots + \beta_{k-1} x + \beta_k x + \varepsilon, \quad (3.24)$$

ve kterém  $\beta$  představují neznámé parametry,  $x_i$  jsou vysvětlované proměnné a  $\varepsilon$  je náhodná složka.

V našem modelu se data odhadují lineární regresí. V teorii regrese, lze využít jak aditivní model  $Y = f(x) + \varepsilon$ , tak i multiplikativní model  $Y = f(x)\varepsilon$ . Je evidentní, že z multiplikativního modelu lze přejít na model aditivní logaritmickou transformací

souřadnic, neboť logaritmus součinu dvou veličin se rovná součtu jejich logaritmů. Důležité je, že šířka intervalu spolehlivosti závisí na počtu prvků zkoumaného souboru, na variabilitě souboru a zvolené přesnosti. Je zřejmé, že čím je interval spolehlivosti delší, tím je přesnost odhadu menší a naopak.

V klasickém lineárním modelu KLM lze interval spolehlivosti parametru regresní funkce určit ze Studentova rozdělení  $t$  s  $(n-p)$  stupni volnosti vztahem

$$t_j = (b_j - \beta_j) / s(b_j), \quad j = 0, 1, \dots, K, \quad (3.25)$$

což dovoluje pro každý parametr  $\beta_j$  sestavit  $(1-\alpha)100\%$  interval spolehlivosti

$$b_j \pm t_{1-\alpha/2} s(b_j), \quad (3.26)$$

kde  $t_{1-\alpha/2}$  je  $(1-\alpha/2)100\%$  kvantil rozdělení  $t$  s  $(n-p)$  stupni volnosti a  $s(b_j)$  jsou odhady směrodatných odchylek. Statistické programy, jakým je např. i STATGRAPHICS [3], samozřejmě umožňují výpočet bodových a intervalových odhadů spolehlivosti pro zkoumané soubory dat.

Nicméně, je třeba se ještě zmínit o metodě opakovaných odhadů (bootstrap) [54], kdy na rozdíl od KLM metody se určuje interval spolehlivosti v opakovaném pořizování náhodných výběrů z původního výběru metodou Monte Carlo. Rozsah těchto výběrů je stejný jako rozsah původního výběru a výběr je prováděn bez vracení, tedy nelze použít dvakrát stejné vygenerované číslo generátorem náhodných čísel. Původní výběr byl získán z normálního rozdělení základního souboru dat, opakované (bootstrapové) výběry jsou generovány z empirického rozdělení. Parametry takto získané výběrové distribuční funkce jsou pak použity při konstrukci intervalů spolehlivosti s danou přesností.

V našem případě jsme pro konstrukci intervalů spolehlivosti použily metodu KLM. V podstatě lze říct, že dva náhodné výběry spolu souvisejí či nikoliv (interakce), mají-li „společnou“ překrývající se část příslušných distribučních funkcí (podrobněji se věnujeme v odst. 3.4). Konfidenční interval pak závisí na parametrech - středních hodnotách  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  a rozptylech  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ . Kriteriem interakce může být prostý poměr rozdílů středních hodnot a středních odchylek  $(\mu_1 - \mu_2)/(\sigma_1 - \sigma_2)$  [7] příslušných rozdělení zkoumaných souborů (determinace, nezávislost, apod.).

Korelaci dvou náhodných veličin můžeme označit za míru jejich lineární závislosti, korelační koeficient pro náhodné veličiny  $X$  a  $Y$  je definován jako [ 20]

$$\rho(X,Y) = \rho(Y,X) = C(X,Y) / \sqrt{D(X)D(Y)}, \quad (3.27)$$

kde

$C(X,Y) = C(Y,X) = E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\} = E(XY) - E(X)E(Y)$  je kovariance  $X$  a  $Y$ ,

$D(X) = E\{[X - E(X)]^2\}$  a  $D(Y) = E\{[Y - E(Y)]^2\}$  jsou rozptyly veličiny  $X$  resp.  $Y$ .

### 3.3.4. Zkoumání vzájemné souvislosti

Vzájemnou souvislost mezi zkoumanými veličinami na vícerozměrném souboru statistických dat lze prověřit metodami moderní statistiky jakými jsou zejména metoda hlavních komponent, faktorová analýza a korespondenční analýza [20]. Tyto metody ve své podstatě řeší obdobný problém, kdy lze variabilitu a závislost původních proměnných vysvětlit pomocí jistého počtu komponent (metoda hlavních komponent) nebo faktorů (faktorová analýza), v korespondenční analýze se pak podobným způsobem sleduje vliv jednotlivých kategorií, jejich vzájemná podobnost (korespondence) či asociace s ostatními kategoriemi. Je však třeba zdůraznit zde již výše uvedené základní předpoklady použití týkající se identifikace a **eliminace** odlehlých nebo naopak příliš vlivných pozorování (mohou podstatným způsobem ovlivnit výsledky analýzy) a **normality** vícerozměrného normálního rozdělení jakož i možné **lineární závislosti** (multikolinearity) zkoumaných veličin. Metodu hlavních komponent a faktorovou analýzu využijeme při analýze dat získaných šetřením o spotřebě energií v domácnostech (kap. 5).

Metoda hlavních komponent (jejímž obsahovým, výpočetním a interpretačním rozšířením je faktorová analýza) vychází z analýzy **kovarianční matice**, zatímco faktorová analýza využívá **korelační matice**. Obě metody se snaží nalézt veličiny, označované za komponenty nebo faktory, vysvětlující variabilitu a závislost studovaných proměnných. Pracujeme-li s výběrovou kovarianční maticí studovaných proměnných  $X_1, X_2, \dots, X_p$ , v případě metody hlavních komponent se snažíme získat diagonální prvky představující rozptyly jednotlivých proměnných, zatímco v případě faktorové analýzy je důležité spočítat korelační matici. Oba modely komponentní a faktorové analýzy jsou dostatečně dobře a obsáhle (i s přihlédnutím k různým

aplikacím) popsány v literatuře [20], zde shrneme pouze relevantní údaje potřebné pro analýzu statistických dat z našeho experimentu (statistického šetření).

Metoda hlavních komponent je založena na vytváření nových proměnných, které jsou vytvářeny postupně s klesajícím významem svého impaktu, nové komponenty jsou vzájemně nekorelované, rozměr úlohy je  $R < p$  ( $R$  – počet nových proměnných, který je výrazně menší než  $p$  - počet původních komponent), předpokládáme, že náhodné veličiny mají vícerozměrné rozdělení s  $p$ -členným vektorem středních hodnot  $\mu$  a s kovarianční maticí  $\Sigma$  (hodnosti  $p$ ). Definujeme jako první hlavní komponentu veličinu

$$Y_1 = \omega_1^T(x - \mu) \quad (3.28)$$

kde  $\omega_1$  je vektor určen maximalizací komponenty  $Y_1$  přes všechny vektory  $\omega_1$  tak, aby byla splněna normalizační podmínka  $\omega_1^T \omega_1 = 1$ . Obdobně definujeme druhou hlavní komponentu

$$Y_2 = \omega_2^T(x - \mu) \quad (3.29)$$

a tak dále, až systém  $R=p$  všech komponent  $Y_1, Y_2, \dots, Y_R$  jednoznačně vysvětlí celkový rozptyl proměnných, přičemž stopa kovarianční matice je daná součtem příslušných středních kvadratických odchylek  $\sigma_i^2$  a tedy součtem diagonálních prvků matice  $\lambda_{(i)}$  :

$$\begin{aligned} st(\Sigma) &= \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_p^2 = D(Y_1) + D(Y_2) + \dots + D(Y_p) = \\ &= \lambda_{(1)} + \lambda_{(2)} + \dots + \lambda_{(p)} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Vztahem

$$\gamma_r = \omega_r \sqrt{\lambda_{(r)}} \quad (3.31)$$

zavedeme tzv. vektor komponentní zátěže, jehož prvky  $\gamma_{jr}$  jsou charakteristické prvky kovarianční matice a rovnají se korelačním koeficientům

$$C(X_j, Y_{r,N}) = \gamma_{jr} \quad (3.32)$$

avšak kovariance  $\gamma_{jr}$  se samozřejmě nerovnají korelačním koeficientům

$$C(X_j, Y_r) = \omega_{jr} \lambda_{(r)} \quad (3.33)$$

ale pro korelační koeficient mezi  $j$ -tou veličinou  $X_j$  a  $r$ -tou komponentou platí (nezávisle na jednotkách měření)

$$\rho(X_j, Y_r) = (\omega_{jr} \sqrt{\lambda_{(r)}}) / \sigma_j = \gamma_{jr} / \sigma_r = \rho(X_j, Y_{r,N}) \quad (3.34)$$

Jako geometrickou interpretaci metody hlavních komponent lze graficky představit shluk  $n$  bodů v  $p$ -rozměrném euklidovském prostoru, jehož osy odpovídají jednotlivým proměnným  $X_1, X_2, \dots, X_p$ . Nalezení lineárních kombinací komponentní analýzou geometricky odpovídá rotaci původního souřadnicového systému tím způsobem, že nové osy procházejí směry maximálního rozptylu shluku bodů. Výpočty kovarianční matice a potřebné příslušné tabulkové a grafické informace provádí statistický soubor programů SPSS [40], jehož jsme použili při zpracování našich statistických dat komponentní analýzou.

Faktorová analýza je vícerozměrná statistická metoda, jejímž hlavním cílem je rovněž rozbor struktury vzájemných závislostí posuzovaných proměnných. Společné faktory jsou definovány jako lineární kombinace původních veličin, přičemž v konečném řešení by každá proměnná měla korelovat s minimálním počtem faktorů. Faktorovou analýzu lze tedy považovat za rozšíření metody hlavních komponent. Obecně model faktorové analýzy vychází z maticového zápisu

$$X = \mu + \Gamma F + \varepsilon, \quad (3.35)$$

ve kterém je  $\Gamma$  matice faktorových zátěží typu  $p \times R$ ,  $F$  je  $R$ -členný vektor společných faktorů a  $\varepsilon$  je  $p$ -členný vektor specifických faktorů. Podle regresní terminologie a definice (3.33) lze faktorové zátěže  $\gamma_{jr}$  označit za regresní koeficienty  $p$  pozorovaných veličin na  $R$  nepozorovatelných faktorech [20]. Prvky  $\gamma_{jr}$  jsou přímo korelačními faktory mezi proměnnými  $X_j$  a faktory  $F$ . Pro faktorový model předpokládáme, že společné faktory  $F$  jsou nezávislé a náhodně rozdělené veličiny, specifické faktory  $\varepsilon$  jsou nezávislé náhodně rozložené veličiny s nulovými středními hodnotami, přičemž faktory  $F_r$  ( $r = 1, 2, \dots, R$ ) a  $\varepsilon_j$  ( $j = 1, 2, \dots, p$ ) jsou nezávislé veličiny pro každou kombinaci  $r$  a  $j$ . Z formulace modelu a předpokladů o proměnných a faktorech vyplývá pro korelační matici

$$\Sigma = \Gamma \Gamma^T + \Psi, \quad (3.36)$$

přičemž  $\psi = C(\varepsilon)$  je diagonální matice řádu  $p$  se specifickými rozptyly  $\psi_j$  proměnných  $X_j$  na diagonále. Rozptyl  $D(X_j) = \sigma_j^2$  je podle (3.36) možno přepsat do tvaru

$$\sigma_j^2 = \sum \gamma_{jr}^2 + \psi_j^2, \quad (3.37)$$

přičemž podíl tohoto faktoru sumy kvadrátů zátěžových faktorů  $\gamma_{jr}$  a střední kvadratické odchylky  $\sigma_j^2$  se označuje za komunalitu  $j$ -té proměnné. Kovariance mezi veličinou  $X_j$  a  $X_{j'}$ , přičemž  $j \neq j' = 1, 2, \dots, p$  lze pomocí faktorových zátěží vyjádřit jako

$$C(X_j, X_{j'}) = \sum \gamma_{jr} \gamma_{j'r}. \quad (3.38)$$

Prvek  $\gamma_{jr}$  je kovariancí mezi veličinou  $X_j$  a společným faktorem  $F_r$ . Z faktorového modelu (3.36) pro normovaná data v souladu s podmínkami nezávislosti neplyne automaticky jednoznačnost faktorů  $F$ . Tuto nejednoznačnost odstraňuje **rotace faktorů**, což je pojem, označující výpočetní operace, kterými se z matice faktorových zátěží získá nová matice korelací mezi faktory (korelační matice). Vzhledem k tomu, že obecně existuje nekonečně mnoho faktorových řešení odpovídajících dané jedné korelační matici, optimálním kritériem aplikovaným na faktorovou rotaci je stupeň přibližující se jednoduché struktuře. Za jednoduchou strukturu považujeme zejména ortogonalitu: pravoúhlá (ortogonální) rotace vede k řešení s nekorelovanými (ortogonálními) faktory a vypovídá tedy o nezávislosti zkoumaných veličin. Tímto způsobem postupuje řada statistických souborů počítající faktorovou analýzu a my jsme pro naši analýzu využili statistický paket SPSS [40], který počítá výše uvedené veličiny.

V krátkosti se zmíníme ještě o korespondenční analýze, která ve své podstatě řeší podobný problém jako komponentní nebo faktorová analýza: je to metoda založená na rozboru struktury vzájemných závislostí dvou a více proměnných znaků uspořádaných do kontingenční tabulky. Standardním nástrojem pro testování nezávislosti v kontingenční tabulce je  $\chi^2$  test, vycházející z testového kritéria založeného na předpokladech nezávislosti sledovaných znaků velikosti tabulky  $r$ -řádků a  $s$ -sloupců rozdělení  $\chi^2$  pro  $(r-1)(s-1)$  stupňů volnosti. Významné programové statistické soubory (SPSS), které počítají faktorovou a komponentní analýzu,

obsahují rovněž výpočty veličin pro korespondenční analýzu, přičemž výpočetní algoritmus vychází z potřeby redukce mnohorozměrného prostoru vektorů řádkových a sloupcových profilů tak, aby byla zachována maximální informace obsažená v původních datech. Výsledky jsou prezentovány v grafické formě tzv. korespondenční mapy nebo ve formě přehledných tabulek.

### **3.4. Interakce ve statistice**

Interakce je jednou ze základních koncepcí statistické analýzy a určení jejího typu charakterizuje správnost interpretace zkoumaného souborů dat. Zvláště v případě, kdy se k primárnímu jevu uvažuje i jev doplňkový, který může mít vliv na celkový výsledek a tento vliv je třeba statisticky odhadnout. Může jít o interferenci dvou anebo i více jevů, které se statisticky zkoumají z hlediska jejich vzájemného působení (interakce), možného vzájemného ovlivňování (interference) a jejich vlivu (relevance) na podstatu zkoumaného jevu. Obvykle je zkoumaný jev ovlivňován různými dalšími jevy a ve statistickém zkoumání lze určit jejich skutečný příspěvek (rozhodující, zanedbatelný, případně žádný). Ve statistice se nezřídka diskutují zejména interakce mezi primárními rovnocennými faktory, kdy výsledný efekt je multiplikativní, je to případ, kdy oba zkoumané jevy mají stejný vliv. Interakce mezi ostatními možnými kombinacemi (kvalitativní a kvantitativní interakce), kdy jeden z jevů je dominantní a druhý tvoří možný příspěvek ke zkoumanému jevu (průběžné interakce v daném rozsahu), jedná se o interakce mezi primárním a vnitřním faktorem, interakce mezi primárním a nespecifikovaným faktorem, jakož i interakce vyšších řádů (vícerozměrné interakce), kdy je výsledný efekt aditivní. Tyto statistické interakce jsou přehledně dokumentovány například v práci [7] zajímavými příklady z velmi specifické oblasti, jakou je epidemiologie, tedy zkoumání dat o vzniku různých onemocnění vlivem okolí, zkoumání způsobu léčby a zkoumání vlivu samotného člověka. Jsou to tedy data dokumentující „postih“ člověka na zdraví vlivy „vnějšími“, které ovlivnit nelze (například kontaminace v pracovním prostředí), tak i „vnitřními“ (kouření, užívání alkoholu, užívání drog, obezita, atd.) vlivy, které ovlivnit lze a nespecifikovanými, případně i náhodnými (nádorová onemocnění) faktory. Výsledky jsou velmi zajímavé: dokumentují například současný vliv užívání alkoholu a kouření na vybraný soubor jedinců, vnější kontaminaci a kouření, vliv tvorby nádorů na stresových faktorech a podobně, přičemž na základě statistické

teorie lze odhadnout dominantní nebo naopak irrelevantní příspěvek jednotlivých faktorů [8,11,13].

Teoretické postupy dokumentované na „epidemiologických“ datech (ohledně zdraví vybraného vzorku populace) lze přenést i na data ekologická a environmentální týkající se kvality životního prostředí. Jedním z důležitých aspektů využití ekologických obnovitelných zdrojů energie je možné snížení tzv. skleníkových plynů, zejména CO<sub>2</sub>, emitovaných do ovzduší klasickými zdroji energií (elektrárny na fosilní paliva). Dalšími zdroji znečištění ovzduší jsou zejména automobily a průmyslové odpady. Pro daný soubor statistických údajů lze zřejmě vydělit relevantní parametry a určit typ statistické interakce, a tím i příspěvek jednotlivých zdrojů energie (dominantní nebo zanedbatelný, aditivní nebo multiplikativní) a statisticky odhadnout, jak velký může být „ekologický“ příspěvek obnovitelných zdrojů ke snížení znečištění ovzduší.

Emise oxidu uhličitého mohou mít vliv na globální oteplování, ale kvůli zvýšeným emisím v ovzduší může docházet i k různým onemocněním lidí. Je tedy žádoucí prokázat existenci spojení emisí a zdravotních rizik na základě statistických dat a jejich analýzy. Například v poslední době americká Univerzita ve Stanfordu zveřejnila výsledky výzkumů, které se zabývají vztahy mezi zvyšováním hladiny oxidu uhličitého v ovzduší a lidskou úmrtností: „Za každý stupeň Celsia, o který se díky emisím CO<sub>2</sub> zvýší teplota vzduchu, zemře na světě přibližně 20 tisíc lidí. Kromě úmrtí způsobuje zvýšení hladiny oxidu uhličitého též častější výskyt astmatu, chronické bronchitidy a onemocnění dýchacího traktu“. Výsledky výzkumu v Kalifornii jsou důležité, neboť v tomto státě USA je šest z deseti měst s nejhorší kvalitou ovzduší ve Spojených státech. I podle zprávy Ministerstva životního prostředí ČR, kterou v říjnu 2007 projednávala vláda ČR, kvůli znečištěnému ovzduší zemřelo v roce 2006 v ČR podle kvalifikovaného odhadu 1,7 až 12,4 tisíc osob (celkem v roce 2006 zemřelo v ČR asi 105 tisíc osob). Nejhorší situace je přitom v průmyslových zónách (Ostravsko-Karvinsko), kdy děti trpí až pětikrát více záněty průdušek. V oblastech s vysokými exhalacemi přibývá též počet nádorových onemocnění (více až o 2 případy na 10 tisíc obyvatel oblasti). Oblasti se zhoršenou kvalitou ovzduší pokrývají téměř 30 % území ČR, kde však žije téměř 67 % procent obyvatel. Data o emisi skleníkových plynů jsou k dispozici za relativně dostatečně dlouhou dobu (minimálně 30 let) a statistické zkoumání tohoto jevu v rámci teorie interakcí je nanejvýš žádoucí. S využitím teorie interakcí ve statistice analyzujeme

dostupná „environmentální“ data týkající se možného snížení emisí CO<sub>2</sub> v ovzduší v důsledku zavedení ekologicky čistých energetických zdrojů.

### 3.4.1. Typy faktorů, variační konstanta, transformace

Faktory, neboli vysvětlující proměnné, můžeme klasifikovat jako kvantitativní proměnné. Příklady z oboru ekologických a environmentálních dat: metody znečišťování různými emisními zdroji (průmyslové zplodiny, fosilní energetické zdroje, automobilová doprava), dosažené (měřitelné) stavy zlepšení kvality ovzduší, kvality použitých zařízení, a podobně. Pro účely zkoumání vlivu různých faktorů a jejich vzájemné interakce můžeme v zásadě vystačit s následující klasifikací:

- Primární faktory (zdroje znečištění ovzduší),
- Vnitřní faktory (stupeň znečištění),
- Nespecifikované faktory (různá kvalita ovzduší před znečištěním například skleníkovými plyny).

Tato klasifikace je podle daného konceptu statistického šetření silně specifická, v náhodném experimentu jsou primárními faktory ty zdroje znečišťování ovzduší, které lze spolehlivě identifikovat. Vnitřní faktory kvantifikují stupeň znečištění a nespecifikované faktory jsou obvykle určeny počátečním stavem před zahájením zkoumání jevu znečištění. Ve statistických šetřeních týkajících se například stavu zdravé skupiny obyvatel (jedinců) jsou primárními faktory způsoby léčby zkoumané nemoci, vnitřními faktory jsou měřitelné efekty zkoumaného druhu onemocnění a v epidemiologickém kontextu nespecifikované faktory obsahující základní údaje jako pohlaví, socioekonomické postavení, vzdělání a rodinné poměry. Role mnoha proměnných zkoumaných jevů závisí silně na kontextu, mohou být hlavním cílem zkoumání nebo vnitřním faktorem.

Velmi častým případem statistického šetření jsou zejména případy interakce dvou faktorů, z nichž jeden je primární. V tomto případě lze uvažovat tři hlavní případy interakce, a to interakci dvou primárních faktorů, interakci primárního s vnitřním faktorem a primárního s nespecifikovaným faktorem. Proto nejdříve prozkoumáme tento jednoduchý případ interakce: uvažujeme data proměnné  $y$ , k nimž přiřadíme pro zjednodušení dva možné faktory; máme tedy úlohu definovanou

implicitně distribučními funkcemi  $F_0(y)$  a  $F_1(y)$ , které odpovídají zkoumaným jevům  $T_0$  a  $T_1$ . Obecně lze předpokládat, že mezi distribučními funkcemi  $F_0$  a  $F_1$  platí vztah

$$F_1(y) = F_0(y - \theta), \quad (3.39)$$

kdy lze daný prvek ze souboru  $y$  vyjádřit součtem charakteristického příspěvku daného jedince a konstanty, která je definovaná jako příspěvek studovaného jevu (jedná se o případ posunutí). Můžeme tedy rozlišit mezi dvěma možnými případy. První nastane tehdy, pokud obě distribuční funkce  $F_1(y)$  a  $F_0(y)$  jsou takové, že pro hodnoty  $y$  může rozdíl obou distribučních funkcí  $F_1(y) - F_0(y)$  nabývat jak kladných tak i záporných hodnot, tedy hodnot obého znaménka; v tomto případě říkáme, že se distribuční funkce  $F_1$  a  $F_0$ , popisující zkoumané jevy  $T_1$  a  $T_0$ , překrývají. Pokud se příslušné distribuční funkce překrývají, jedná se o interakci, kvantitativně určenou mírou překrytí obou funkcí. Pokud se obě funkce nepřekrývají, nejde o interakci. Pokud mají distribuční funkce  $F_1$  a  $F_0$  přibližně normální rozdělení, lze je tedy charakterizovat středními hodnotami  $\mu_1$ ,  $\mu_0$  a směrodatnými odchylkami  $\sigma_1$ ,  $\sigma_0$ . Dvě distribuční funkce se mohou překrývat na hladině významnosti pravděpodobnosti  $k$ , kde

$$k = (\mu_1 - \mu_0) / (\sigma_1 - \sigma_0), \quad (3.40)$$

přičemž kritérium  $|k| < 2$  určuje míru překrytí [28]. Jinými slovy, při vysokých hodnotách hladiny  $k$  nedochází k překrytí dvou distribučních funkcí a tedy ani k interakci dvou zkoumaných jevů. Když se  $k$  blíží nule, dochází k posuvu obou distribučních funkcí vůči sobě a tím i jejich překrytí a tedy k interakci zkoumaných jevů. To vyplývá z definice parametru  $k$ . Za těchto podmínek lze určit interval spolehlivosti pro body překrytí.

Interakci lze transformovat do logaritmického měřítka kvůli názornosti interpretace zejména v případě, kdy se jde o společného působení dvou jevů (aditivní interakce). Tento postup obvykle umožňuje částečně zjednodušit interpretaci výsledků interakce; někdy toto zjednodušení může být v lineárním měřítku obtížně interpretovatelné [11]. Transformované interakce nemusí být vždy konzistentní s interpretací (například, kdybychom v lékařských statistikách neuvažovali rozlišení pohlaví, tedy zda pacientem je muž nebo žena, určitě bychom nemohli učinit závěry

o interakci jevů v závislosti na tom, zdali je použitá léčba v daném měřítku přínosná pro muže a naopak zhoršuje zdravotní stav u žen, a to nezávisle na tom, ať už je použitá jakákoliv transformace měřená na daném souboru). Pro spojitou proměnnou  $y$  lze běžně použít semilogaritmického měřítka (jedna osa je logaritmická, druhá lineární). Pro binární data může být efektivním použitím logaritmického měřítka (obě osy jsou logaritmické); multiplikativní efekt interakce se v logaritmickém měřítku transformuje na aditivní, což může být užitečné pro samotné zkoumání interagujících jevů, kdy prvořadým hlediskem je jednoduchá interpretovatelnost výsledků [14]. Někdy například logaritmická transformace na třetí odmocninu  $y^{1/3}$  posouvá interakci do jiného měřítka, pokud ale proměnnou  $y$  představuje například objem (třírozměrná veličina), třetí odmocnina  $y^{1/3}$  nemusí představovat vhodné měřítko pro interpretaci.

### **3.4.2. Interakce mezi dvěma primárními faktory**

#### **Kvantitativní interakce**

Interpretace kvantitativní interakce mezi dvěma primárními faktory může být dost komplikovaná. Z definice kvantitativní interakce je zřejmé, že není třeba brát v úvahu transformační měřítka. Výsledky mohou být zkoumány mnohem jednodušeji, pokud interakce neexistuje, ale jak již bylo zmíněno výše, zkoumání dat daného souboru musí brát v úvahu měřitelné efekty v měřítku, které je někdy obtížné interpretovat. Je zřejmé, že interpretace často závisí na účelu samotného statistického šetření.

Jako příklad můžeme uvést zkoumání [18] současného vlivu kontaminace specifického vzorku jedinců vystavených při práci vdechování azbestu a kouření (těch samých jedinců) na možné riziko onemocnění rakovinou plic. Byly uskutečněny dva statistické testy na zkoumání možné interakce mezi těmito dvěma primárními faktory: jeden na základě aditivního modelu a jeden na základě multiplikativního modelu. Relativní riziko vzniku rakoviny plic v důsledku dvou jevů (primárních faktorů), tedy kontaminace dávkou azbestu a kouření pro každou exponovanou skupinu porovnanou s těmito subjekty, které nebyly vystaveny ani jednomu rizikovému faktoru (nekuřáci, kteří nebyli vystaveni působení azbestu). Z prezentovaných výsledků bylo zjištěno, že pozorované relativní riziko pro společný efekt dvou rizikových faktorů bylo podstatně menší, než aby je bylo možné vysvětlit multiplikativním modelem, ale bylo o něco větší než očekávané pro čistě aditivní model. Jinými slovy, efekty kontaminace plic jedince současně azbestem a

tabákem mohou být aditivní ve smyslu možného vzniku rizika rakoviny plic (výsledný efekt může být součtem jednotlivých efektů), jde o kvantitativní interakci. Protože biologická nebo jiná informace, která by jednoznačně upřednostnila jeden vliv před druhým je jen zřídka k dispozici [51], není možné použít obě interpretace. V tomto případě se zájem autorů zkoumaného jevu netýkal možnosti objasnit biologické mechanismy, ale především zejména informovat veřejnost o tom, zda současné vdechování azbestu a kouření je „škodlivější“ pro možné riziko onemocnění rakovinou plic; jinými slovy, autoři se zajímali o to, jestli by měly být brány speciální ohledy na ty osoby, které kouří a zároveň přicházejí v práci do styku s kontaminací azbestem s tím, že by těmto osobám mělo být zakázáno kouření. Nicméně, statistické zkoumání vlivu interakce obou těchto zdrojů kontaminace bylo na vysoké hladině významnosti zjištěno, že zákaz kouření není nutný; kuřáci, kontaminováni při své práci azbestem, mají totiž přibližně stejně vysoké riziko vzniku rakoviny plic způsobené kouřením jako nekuřáci. Několik autorů odkazuje na tuto absenci „interakce veřejného zdraví“ [9,47].

### **Kvalitativní interakce**

Kvalitativní interakce jsou relativně vzácné, ale jejich statistické šetření bývá předmětem patřičného zájmu: například, ve studii „Milion Women UK“ byl získán důkaz kvalitativní interakce mezi dvěma primárními faktory [6], jimiž byly užívání hormonální terapie (HRT) a index tělesné hmotnosti (BMI) při zkoumání rizika vzniku onemocnění rakovinou; zkoumala se závislost vzniku rakoviny tlustého střeva na celkové tělesné hmotnosti charakterizované BMI. Index tělesné hmotnosti BMI je definován jako podíl hmotnosti zkoumaného jedince (udávané v kg) k druhé mocnině výšky (udávané v m). Bylo překvapivě zjištěno, že pacientky s normální tělesnou hmotností ( $BMI < 25 \text{ kg/m}^2$ ) byly zatíženy podstatně větším rizikem onemocnění rakovinou, pokud používaly tento typ HRT, zatímco u obezních patientek ( $BMI > 30 \text{ kg/m}^2$ ) bylo toto riziko významně nižší [5].

### **Interakce na spojitém měřítku**

Některé zvláštní případy mohou nastat, když uvažujeme interakci mezi dvěma primárními faktory, které jsou na přibližně kvantitativně stejné úrovni.

Jako příklad můžeme uvažovat hladiny dvou zdrojů znečištění atmosféry, výsledkem čehož může docházet ke zvýšení výskytu onemocnění daného typu.

Interakci mezi dvěma kvantitativními faktory na příslušných úrovních  $x_1$  a  $x_2$  lze popsat pomocí zobecněného aditivního modelu [19]

$$E\{Y(x_1, x_2)\} = a_1(x_1) + a_2(x_2), \quad (3.41)$$

kde  $Y(x_1, x_2)$  je výstupem pro jedince s danou hladinou vysvětlující proměnné.

Rozlišíme dva případy: V prvním jsou  $x_1$  a  $x_2$  různé druhy faktorů, které odpovídají nezávislým efektům (na nezávislých statistických zjištěních). V tomto případě lze interakci testovat formálně pomocí kvantifikovaných odhadů: pro případ jednoduchým součinem  $x_1 x_2$  nebo ještě lépe  $\hat{a}_1(x_1) \hat{a}_2(x_2)$ , kde  $\hat{a}_j(x_j)$  je estimátor (viz odst. 3.2) veličiny  $a_j(x_j)$ . V druhém případě, kdy  $(x_1, x_2)$  jsou koordináty specifických bodů v prostoru, lze funkci proměnných  $(x_1, x_2)$ , rozvinout do Taylorovy řady. Z tohoto hlediska však již nejde o model lineární ve vysvětlujících proměnných, neboť jako proměnnou lze uvažovat i součiny typu  $x_1 \cdot x_1$ ,  $x_1 \cdot x_2$  a  $x_2 \cdot x_2$ . V tomto kontextu zobecněný aditivní model nemusí být jednoznačný [4,10,12].

### 3.4.3. Interakce mezi primárním a vnitřním faktorem

Interpretace interakce mezi primárním a vnitřním faktorem je jednoznačná. Charakter obou možných efektů lze studovat odděleně na různých úrovních vnitřního faktoru, což se někdy nazývá jako “zkoumání efektu modifikace“. Statistické metody pro oceňování interakcí mezi primárními a vnitřními faktory jsou v podstatě stejné jako ty, které jsou používány pro ocenění interakce mezi dvěma primárními faktory, avšak interpretace je odlišná, neboť role primárního a vnitřního faktoru jsou asymetrické. V tomto případě se interakce může měnit v závislosti na vnitřní proměnné. Například statistické šetření popsané v práci [48] zjistilo, že riziko onemocnění Parkinsonovou chorobou u mužské populace není závislé na vysoké spotřebě kávy; statistické šetření bylo provedeno pouze pro náhodný vzorek výlučně mužské populace a nikoli pro vzorek populace ženské. Tím, že se statisticky nezkoumalo riziko onemocnění i pro vzorek ženské populace, nelze vůbec jednoznačně interpretovat, že by riziko onemocnění tzv. Parkinsonovou nemocí ze zjištěné vysoké úrovně spotřeby kávy jak pro muže, tak i ženy bylo statisticky nevýznamné.

#### 3.4.4. Interakce mezi primárním a nespecifikovaným faktorem

Jako příklad interakce mezi primárním a nespecifikovaným faktorem můžeme uvést znečištění prostředí v důsledku exhalací ze zdrojů klasických elektráren. Ke znečištění ovzduší může ovšem docházet i vlivem nespecifikovatelných faktorů. Určit příspěvek každého z nich je možno následovně. Uvažujme, že existují dva alternativní způsoby znečištění životního prostředí ze zdrojů  $T$  a  $C$  (primární faktory) a že míru znečištění sledujeme statisticky odděleně na daném konečném ekosystému v různých regionech (nespecifikované faktory). Uvažujme, že máme k dispozici změřené hladiny znečištění v důsledku každého zdroje znečištění. Pokud je výsledek jednoho ze zdrojů jasně statisticky významný pro určitý region, je pomocí interakce primárního jevu odhadnout variaci způsobující tento efekt i v všech ostatních zkoumaných regionech.

#### 3.4.5. Interakce vyšších řádů

Obtížnost interpretace interakcí se podstatně zvyšuje s počtem zkoumaných faktorů, když přecházíme od „klasického dvoufaktorového“ zkoumání k vzájemné interakci mnoha různých faktorů. V tomto případě mluvíme o zkoumání interakcí vyšších řádů, kdy na výsledný efekt působí celý soubor různých faktorů a statistické zkoumání si klade za cíl určit (pokud možno co nejpřesněji a nejprůkazněji), jejich konkrétní příspěvek. Při zkoumání znečištění životního prostředí je takovéto zkoumání opodstatněné a žádoucí. Proto se například statistické šetření [61] zabývalo studiem vlivu současného působení několika rizikových faktorů (kouření tabáku, žvýkání tabáku a používání alkoholických nápojů) na onemocnění rakoviny ústní dutiny. Bylo zjištěno, že výsledný efekt současného působení všech tří faktorů je výrazně menší, než v případě interakcí pouze dvou zbývajících faktorů; přitom kombinace výsledků vlivu současného působení dvou faktorů s třetím vedlo k následujícím závěrům: společný efekt kouření a žvýkání tabáku byl mnohem menší, než u působení všech tří rizikových faktorů současně, zatím co společný efekt žvýkání tabáku a pití alkoholu byl pro aditivní a multiplikativní model téměř stejný; hlavním příspěvkem do interakce tří faktorů k celkovému zkoumanému efektu (onemocnění) byla kombinace kouření tabáku a pití alkoholu.

Multiplikativní interakci v tomto případě lze popsat vztahem

$$\Pi_{ij} = \pi_i \cdot \pi_j \psi_{ij} , \quad (3.42)$$

ve kterém je  $\pi_{ij}$  pravděpodobnost kombinace faktorů  $i$  a  $j$ , přičemž  $\pi_i$  a  $\pi_j$  jsou jejich marginální pravděpodobnosti a  $\psi_{ij}$  popisuje interakci zbývajících kombinací.

Vztah (3.42) lze samozřejmě zobecnit na libovolný počet parametrů [1,17] :

$$\Pi_{ij;m} = \pi_{i;m} \cdot \pi_{j;m} \cdot \rho_m \psi_{ij;m} \quad (3.43)$$

Obecně lze říci, že interakce vyšších řádů jsou složité a náročné jak pro zpracování, tak i pro samotnou interpretaci. Studium interakce vyšších řádů přesahuje rozsah této práce, a proto jsme uvedli jenom základní pojmy a ilustrovali je na jednoduchém případě, podrobněji lze problematiku studovat v rozsáhlé literatuře, citace literatury jsou uvedeny například v práci [52]. Nejobvyklejším předmětem statistického zkoumání interakcí jevů zůstává model dvou faktorů, v němž studujeme interferenci dvou různých jevů na výsledný efekt. K tomuto modelu se ještě vrátíme v následujícím odstavci, v němž se budeme věnovat nejjednoduššímu případu: model dvou faktorů, z nichž je jeden faktor primární.

### 3.4.6. Epistatický model (jednoduchý model dvou interakcí)

Uvažujeme jednoduchou variantu modelu dvou faktorů, z nichž je jeden primární. Existují dva faktory dvou úrovní  $i = (-1, 1)$  a  $j = (-1, 1)$  s odpovídající hodnotou  $(i,j)$  a interakci lze popsat vztahem

$$M_{ij} = M + A_i + B_j + C_{ij} . \quad (3.44)$$

V případě, že interakce neexistuje, je  $C = 0$ . V jednoduchém epistatickém modelu je

$$M_{11} = L + N, \quad M_{ij} = N . \quad (3.45)$$

Rovnice (3.44) a (3.45) popisují „dvouparametrický“ model. V nejjednodušším případě můžeme předpokládat  $L=0$  a řešit odhad parametrů distribuční funkce pouze v případě  $M_{11} = M_{ij} = N$  jediné funkce popisující rozdělení jednoho primárního jevu.

Příspěvek druhého faktoru vezmeme jako opravu k získaným výsledkům. O tom, zdali interakce existuje, rozhodne výběrové kritérium popsané rovnicí (3.40).

### 3.4.7. Ostatní modely

O některých specifických modelech interakcí se zmíníme pouze okrajově, protože pro racionální analýzu nemají velký význam. Statistická analýza musí být proveden rychle (tedy v rozumném čase) a s dostatečně vysokou přesností na reprezentativním souboru zkoumaných dat. I když v sociologii (například již citované epidemiologii a obecně v medicíně) a ekonomii (a to i v environmentální ekonomii) je určitě důležité zkoumat najednou celou řadu vlivů na zkoumaný efekt, statistické zkoumání může být pracné a výsledek nemusí působit věrohodně (odhadnout příspěvek daného faktoru, jednoho z mnoha, může být velmi nepřesné a interpretace může být tudíž zavádějící). Je třeba tedy zvážit, které faktory pro dané statistické šetření jsou podstatné a které nikoliv.

Pro úplnost tohoto přehledu je třeba se zmínit o těchto modelech:

**Interakce pro výběr nerovnovážných faktorů:** Jde o komplikovanou formu zkoumání dat pomocí faktorové analýzy [20], kdy se jednotlivým datům přiřazují vybrané faktory. Tato poměrně komplikovaná metoda má výhodu v tom, že lze odhadnout příspěvky faktorů vyšších řádů.

**Interakce pro systémy dat velkého rozsahu:** Důraz je kladen na zpracování velkého počtu statistických dat popsaných množstvím distribučních funkcí různého tvaru. Zde je třeba uvést, že se nejedná o moderní metodiku. Tou je relativní novinka v oboru zpracování hromadných dat, kterou je například metoda nepřímého výběru [38], a kterému jsme se podrobně věnovali v odst. 3.2 této kapitoly.

### 3.4.8. Aplikace pro environmentálně ekonomická data

Jak zde již bylo řečeno, postupy pro analýzu statistických dat dokumentované na datech z lékařských statistických šetření lze též úspěšně přenést do jiné zajímavé oblasti a tou je environmentální ekonomie. Příkladů znečišťování životního prostředí v důsledku lidských aktivit (výroba energie z fosilních paliv, energeticky náročné provozy, těžká chemie a metalurgie, atd.) je hodně a mají jeden společný efekt: zamořování ovzduší tzv. skleníkovými plyny, zejména oxidem uhličitým (produkt spalování fosilních paliv v elektrárnách, teplárnách a automobilech). Pokusíme se

aplikovat výše uvedené postupy teorie statistické interakce na tato data. Data byla vesměs získána z veřejně známých zdrojů, jakými jsou Český statistický úřad [55], Ministerstvo ČR pro životní prostředí, [57], [58], Ministerstvo zdravotnictví ČR [56] a světový server pro obnovitelné energie [43, 44, 59] .

Data o znečištění životního prostředí emisemi oxidu uhličitého CO<sub>2</sub> ukazují, že kromě znečištění emisemi z fosilních paliv (tepelné elektrárny) je významným zdrojem znečištění ovzduší též automobilový průmysl. Každé auto v provozu na silnicích emituje zhruba 125 až 210 gramů CO<sub>2</sub> na každý ujetý kilometr. Máme-li tedy k dispozici údaje o provozovaných automobilech (v roce 2007 bylo v ČR registrováno 5,696 milionů automobilů, které platí–povinné pojištění a průměrně ujetých kilometrech za rok (v ČR je to 2054 km/rok), zjistíme, že v ČR je to až 2,27 mil. tun emisí CO<sub>2</sub> ročně. Ve srovnání s tepelnými elektrárnami je to ovšem výrazně méně. Znečištění ovzduší CO<sub>2</sub> z fosilních paliv představuje až 13,32 mil. tun ročně, (ČR je přitom zároveň významným producentem elektrické energie z jaderných elektráren, je to téměř 36 % z celkové bilance vyrobené elektrické energie, přičemž jaderná energie není zdrojem znečištění ovzduší v důsledku emisí kyslíčnicku uhličitého). Údaje jsou uvedeny v tab. 3.4, kde jsou pro srovnání též uvedeny dostupné údaje ve Spolkové republice Německo (SRN). Je třeba říci, že ve všech případech analyzujeme údaje za rok 2007. V tab. 3.5 prezentujeme výsledky týkající se určení typu interakce při statistickém zkoumání dat tohoto typu v celé ČR a v „moravských“ krajích ČR: kraje Moravskoslezského (1269367 obyvatel), Jihomoravského (1127718 obyvatel), Zlínského (595010 obyvatel) a Olomouckého (639369 obyvatel). Je vidět, že dominantním zdrojem znečištění jsou fosilní paliva, příspěvek znečištění ovzduší v důsledku emise výfukových plynů automobilů provozovaných na pozemních komunikacích obou zemí (ČR a SRN) je menší. Proto k interakci nedochází a vliv obou zdrojů je třeba zkoumat odděleně. Zajímavá je však situace v Jihomoravském a Zlínském kraji, které nejsou v takové míře zahlceny emisemi CO<sub>2</sub> z fosilních paliv, ale automobilový provoz je tam stejný jako v krajích postižených vysokými průmyslovými exhalacemi (zejména Moravskoslezský kraj, a to ostravsko-karvinský uhelný revír, který představuje až 40 % z celkové bilance emisí v ČR). V těchto případech byla detekována interakce typu hlavní faktor (fosilní paliva) a vedlejší faktor (automobily). Ještě zajímavější může být situace v případě, kdy bude část fosilních zdrojů nahrazena obnovitelnými zdroji. Například Německo se zavázalo do roku 2015 produkovat až 15 % celkové energie z obnovitelných

zdrojů a v tomto případě (a s přihlédnutím k růstu spotřeby elektrické energie do roku 2015) by byl faktor interakce  $k$  již menší než dva a samozřejmě by šlo o interakci uvažovaných zdrojů znečištění (navíc může vzrůst emise spojená s růstem provozu automobilů na pozemních komunikacích). ČR se v rámci EU rovněž zavázala zvýšit výrobu energie z obnovitelných zdrojů na 10 % do roku 2015 a v tom případě by byla hodnota  $k = 2$ , tedy přesně na hranici interakčního kritéria.

Emise oxidu uhličitého do ovzduší mají vliv nejen na klimatické změny, ale též na různá onemocnění, především pak onemocnění plic a horních cest dýchacích (HCD) - chronická bronchitida a astma. V tab. 3.5 se pokoušíme o odhad rizika chronických onemocnění:

Tab. 3.4 Určení typu interakce při statistickém zkoumání současného vlivu dvou různých zdrojů znečištění [44,55,57-59]

| Země / kraj     | Znečištění ovzduší CO <sub>2</sub> automobily [t/rok] | Znečištění ovzduší CO <sub>2</sub> fosilními palivy [t/rok] | Kritérium interakce $k$ | Interakce | Typ interakce       |
|-----------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------|---------------------|
| SRN             | 17,562 mil.                                           | 146,57 mil.                                                 | 5,22                    | ne        | -                   |
| ČR              | 2,267 mil.                                            | 13,32 mil.                                                  | 4,18                    | ne        | -                   |
| Moravskoslezský | 0,138 mil.                                            | 5,27 mil.                                                   | 2,69                    | ne        | -                   |
| Jihomoravský    | 0,177 mil.                                            | 0,94 mil.                                                   | 1,71                    | ano       | primární - vedlejší |
| Zlínský         | 0,099 mil.                                            | 0,71 mil.                                                   | 2,00                    | ano       | primární - vedlejší |
| Olomoucký       | 0,112 mil.                                            | 0,75 mil.                                                   | 2,06                    | ne        | -                   |

Tab. 3.5 Odhad rizika chronickým onemocněním horních cest dýchacích (HCD) v důsledku znečištění ovzduší CO<sub>2</sub> z obou zdrojů znečištění [44,55,57-59]

| Země / kraj     | Počet onemocnění HCD na počet obyvatel kraje | Znečištění ovzduší CO <sub>2</sub> automobily [t/rok] | Znečištění ovzduší CO <sub>2</sub> elektrárnami [t/rok] | Relativní riziko onemocnění | Konfidenční interval pro kombinaci obou typů znečištění na hladině 95 % |
|-----------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Moravskoslezský | 3,91%                                        | 0,013 mil.                                            | 5,27 mil.                                               | 1,00                        | <0,33 - 25,68>                                                          |
| Jihomoravský    | 1,58%                                        | 0,017 mil.                                            | 0,94 mil.                                               | 0,47                        | <0,11 - 5,74>                                                           |
| Zlínský         | 1,41%                                        | 0,009 mil.                                            | 0,71 mil.                                               | 0,37                        | <0,32 - 3,59>                                                           |
| Olomoucký       | 2,26%                                        | 0,012 mil.                                            | 0,75 mil.                                               | 0,26                        | <0,20 - 1,73>                                                           |
| ČR              | 1,92%                                        | 0,107 mil.                                            | 13,32 mil.                                              | 0,32                        | <0,18 - 14,41>                                                          |

HCD v důsledku příspěvků z obou zdrojů znečištění (emise CO<sub>2</sub> z automobilů a elektráren spalujících fosilní paliva). V úvahu jsme vzali opět údaje pro čtyři moravské kraje ČR a údaje z těchto regionů samozřejmě srovnáváme s celorepublikovými údaji. Relativně je počet onemocnění HCD malý, ovšem relativní riziko onemocnění v Moravskoslezském kraji (opět možný vliv ostravsko-karvinského uhelného revíru) je až 3 krát větší, než je celorepublikový průměr a dominantní je příspěvek od znečištění ovzduší emisemi CO<sub>2</sub> ze zdrojů energie. Nejmenší je relativní riziko onemocnění v Olomouckém kraji, největší pak v kraji Moravskoslezském. Při nahrazení 10 % fosilních zdrojů obnovitelnými zdroji do roku 2015 by se toto relativní riziko z hodnoty 1,00 interval spolehlivosti (0,33 – 25,68) snížilo na 0,86 interval spolehlivosti (0,44 – 22,17), pokud by nedošlo ke změně znečištění ovzduší z automobilů na pozemních komunikacích, ale i tak by při zvýšení emisí z automobilů jenom o 10 % bylo relativní riziko onemocnění 0,89, tedy o 11 % nižší.

## 4. Analýza dat z hlediska ekonomických modelů

### 4.1. Růstový model

Od roku 1990 jsou k dispozici poměrně přesná data na světovém trhu s obnovitelnými energiemi [42-44, 59, 60]. Trh s obnovitelnými energiemi představují zejména fotovoltaické (PV) panely (fotovoltaika je přímá konverze slunečního záření na elektrickou energii v solárním článku) a termosolární (TS) kolektory určené k solárnímu ohřevu teplé užitkové vody [33]. Námi dříve provedená analýza [29, 30], založená na parametrizaci publikovaných dat metodou nejmenších čtverců prokázala, že chování trhu lze popsat vztahem, který představuje exponenciální nárůst

$$m_t = m_0(1 + r)^t = m_0 \exp [t \cdot \ln(1+r)], \quad (4.1)$$

přičemž  $m_t$  je množství prodaných PV-modulů nebo TS-kolektorů za dané období  $t$  (v letech) a  $r$  představuje parametr nárůstu prodeje za toto období (za rok). Výsledky této modelové parametrizace statistických údajů (obr.4.1a, 4.1b) jsou následující:

$$m_t = 1,128(1 + 0,398)^t,$$

tedy 39,8% nárůst pro PV trh a

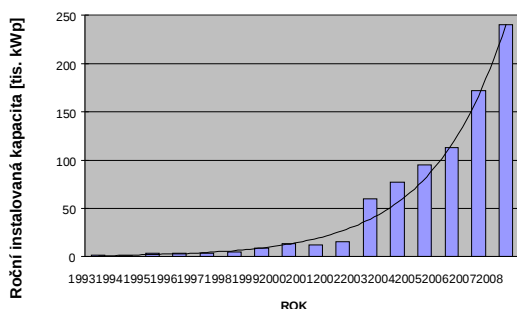
$$m_t = 0,093(1 + 0,165)^t,$$

tedy 16,5% nárůst pro TS trh.

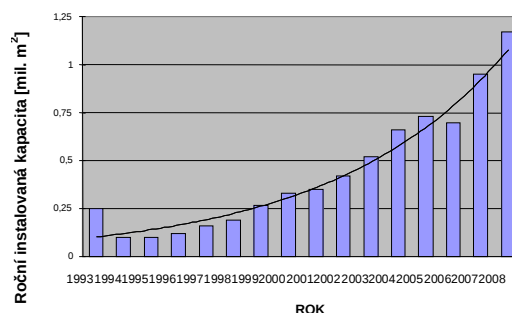
Odpovídající cenové relace  $P_t$  v daném období mohou být určeny ze vztahu

$$P_t = P_0 \left(1 + \frac{M_t}{M_0}\right)^{-n} \quad (4.2)$$

v kterém jsou  $M_t$  kumulativní prodeje v daném období  $t$ .  $P_0$  a  $M_0$  jsou ceny a kumulativní prodej pro  $t = 0$ . To značí, že pokaždé, když se kumulativní trh zdvojnásobí, cena modulu nebo kolektoru na trhu se redukuje faktorem  $2^n$ , kde  $n$  je charakteristickým parametrem pro daný produkt na trhu, určovaný parametry exponenciálního růstu dle vztahu (4.1); určili jsme odpovídající hodnoty  $n = 0,272$  pro PV statistiku, respektive  $n = 0,138$  pro TS statistiku. Výsledky analýzy dat na trhu s PV moduly a TS kolektory na základě výše popsaného jednoduchého modelu exponenciálního růstu (růstový model), určeného vztahy (4.1) a (4.2), umožnily získat první hrubé odhady parametrů tohoto trhu, tj. kumulativní prodeje a ceny a jejich extrapolaci do blízké budoucnosti. Použitím tohoto modelu neomezené poptávky můžeme určit přijatelnou cenu na současném trhu PV modulů (3,5 EUR/W<sub>p</sub>) a TS kolektorů (215 EUR/m<sup>2</sup>).



Obr. 4.1a Statistická data pro PV model



Obr. 4.1b Statistická data pro TS

## 4.2. Model konstantní elasticity

Je zřejmé, že jednoduchý model “neomezené poptávky” založený pouze na exponenciálním růstu je z řady různých důvodů ekonomicky nerealistický a dlouhodobě nevyhovující. Jedním z těchto důvodů je zejména cena, která se na trhu mění a musí být tedy brána v realistické koncepci jako variabilní parametr. Vliv ceny jako variabilního parametru lze zahrnout do modelu, ve kterém zavádíme parameter

elasticity  $E$  (model elasticity je známá ekonomická koncepce [49]), a tuto definujeme jako podíl množství prodaných výrobků a jejich ceny:

$$E = -\frac{p}{m} \frac{dm}{dp} \quad (4.3)$$

Míra elasticity určuje, o kolik procent se zvýší poptávka při poklesu ceny o jedno procento. Ekonomický parametr elasticity  $E$  tedy představuje procentuální růst relativního trhu, kdy se relativní cena zmenšuje, a tedy vlastně určuje vztah mezi cenou a odbytem daného produktu na trhu. Uvažujeme-li elasticitu  $E$  jako konstantní parametr (model konstantní elasticity), platí

$$\frac{p}{p_0} = \left( \frac{m}{m_0} \right)^{-\frac{1}{E}} \quad (4.4)$$

a po dosazení do rovnice (4.2) máme

$$\left( \frac{m}{m_0} \right)^{\frac{1}{En}} = 1 + \frac{\int_0^t m dt}{M_0} \quad (4.5)$$

Označíme-li normalizované proměnné jako

$$m = \frac{m}{m_0}; \quad g = \frac{M}{M_0}; \quad p = \frac{p}{p_0}; \quad r = \frac{M_0}{m_0}; \quad e = \frac{1}{En}; \quad t = \frac{t}{r}; \quad f = w^{-n} \quad (4.6)$$

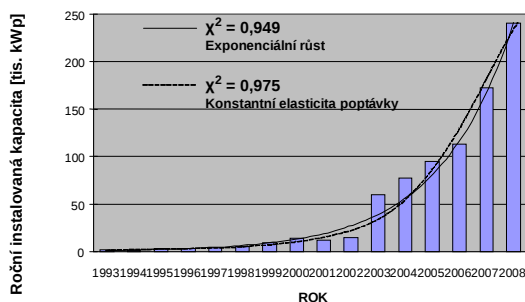
můžeme přepsat (4.5) do tvaru

$$\int_0^t m dt = m^e - 1; \quad \text{tj.} \quad m = e m^{e-1} \frac{dm}{dt}, \quad (4.7)$$

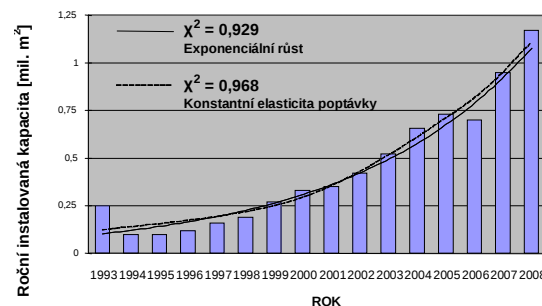
Řešení této rovnice je pro počáteční podmínku  $\mu(0)=1$  následující:

$$m = \left[ 1 + t \left( 1 - \frac{1}{e} \right) \right]^{\frac{1}{e-1}}; \quad \text{tj.} \quad m = [1 - t(En - 1)]^{\frac{En}{En-1}}. \quad (4.8)$$

Analýzou dat pro PV (obr. 4.1a) a TS (obr. 4.1b) určíme relevantní parametry: elasticitu  $E$ , koeficient  $n$  jakož i růstový parametr  $r$ . Výsledky této analýzy prezentujeme na obr. 4.2a (PV statistika) a obr. 4.2b (TS statistika).

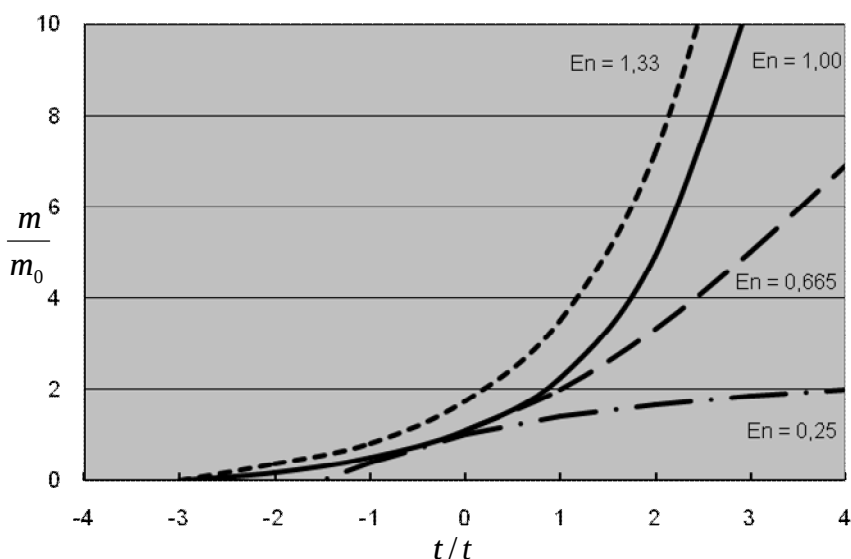


Obr. 4.2a: PV-data: exponenciální růst  
 $r = 0,389$  a model konstantní  
elasticity  $En = 1,39$



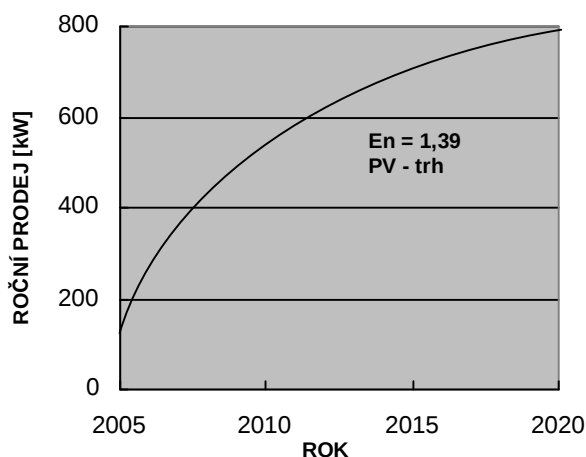
Obr. 4.2b: TS-data: exponenciální růst  
 $r = 0,165$  a model konstantní  
elasticity  $En = 1,22$

Je třeba zdůraznit, že rovnice (4.8) představuje chování trhu pro konstantní elasticitu  $E$  a koeficient  $n$ , pro daný soubor dat je tedy součin  $En$  charakteristický; chování trhu je v rámci tohoto modelu popsáno parametry  $\varepsilon = 1/En$ ,  $M_0$  a  $p_0$ . Je tedy zřejmé, že poptávka na trhu závisí na součinu parametrů  $En$ . Nyní provedeme diskusi rovnice (4.8): Pro  $\varepsilon = En = 1$  jde o exponenciální růst  $\mu = e^r$ . Pro  $En > 1$  ( $\varepsilon < 1$ ) trh představuje vertikální asymptotu  $\tau = 1/(En-1)$  a pro  $En < 1$  ( $\varepsilon > 1$ ) je růst popsán konvexní nebo konkávní (když  $En < 0,5$ ) parabolou. Tyto čtyři možné případy ilustrujeme na obr. 4.3.

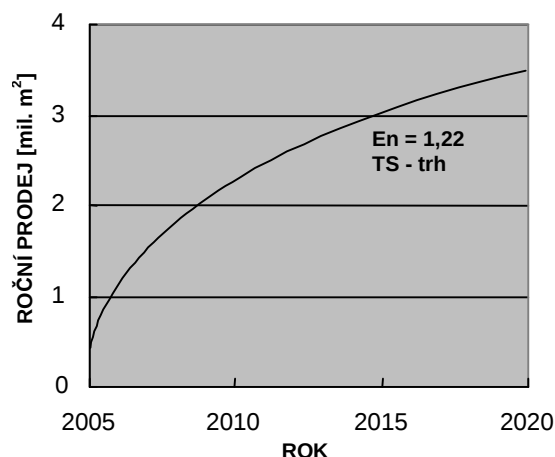


Obr. 4.3 Normalizovaná rozdělení pro různé hodnoty  $En$

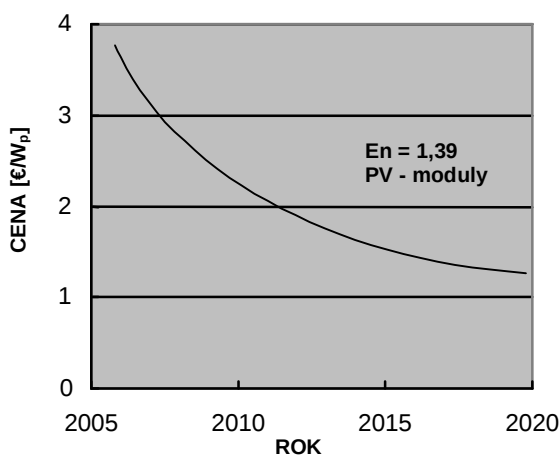
Z tohoto obrázku je vidět, že vysoké hodnoty  $En$  ukazují na rychle expandující trh, dokonce rychleji než je tomu v případě exponenciálního růstu. V tomto případě je zřejmé, že součin  $En$  nemůže být konstantní a je třeba uvažovat jiný typ modelu, v němž by byla konstantní elasticita nahrazena variabilní proměnnou (variabilní model). V námi provedené analýze jsme určili hodnoty  $En=1,39$  (PV) a  $En=1,22$  (TS); příslušné hodnoty koeficientu determinace  $R^2$  jsou v tomto případě menší, než je tomu v případě modelu exponenciálního růstu 39,8 % (PV) a 16,5 % (TS) - viz obr. 4.2a, 4.2b – model konstantní elasticity popisuje statistická data lépe než prostý růstový model. Příslušné extrapolace do roku 2020 předpokládaných ročních prodejů PV modulů a TS kolektorů uvádíme na obr. 4.4a, 4.4b a jejich předpokládaných cen v jednotlivých letech na obr. 4.5a, 4.5b.



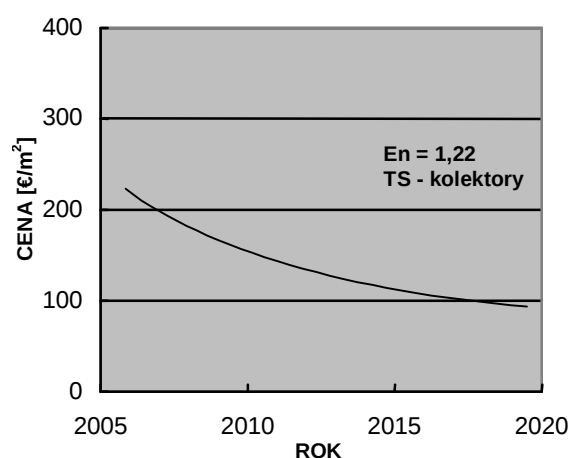
Obr. 4.4a Extrapolace prodeje PV modulů



Obr. 4.4b Extrapolace prodeje TS kolektorů



Obr. 4.5a Extrapolace cen PV modulů



Obr. 4.5b Extrapolace cen TS kolektorů

### 4.3. Model variabilní elasticity

V tomto modelu uvažujeme elasticitu jako variabilní veličinu,  $E$  je tedy funkcí proměnných, kterými jsou čas, objem trhu a cena. Označíme-li

Použitím proměnných, definovaných vztahy (4.6), lze rovnice (4.2) a (4.3) přepsat do tvaru

$$w = 1 + \int_0^t m dt; f = w^{-n}; dm = E(m, f, t) \frac{m}{f} df \quad (4.9)$$

a transformovat na soustavu rovnic

$$w_{i+1} = w_i + m_i \Delta t \quad (4.10a)$$

$$f_{i+1} = w_{i+1}^{-n} \quad (4.10b)$$

$$m_{i+1} = m_i + E(m_i, f_i, t_i) \frac{m_i}{f_i} (f_{i+1} - f_i) \quad (4.10c)$$

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t \quad (4.10d)$$

pro odpovídající počáteční podmínky:

$$w_1 = 1 + \Delta t \quad (4.11a)$$

$$f_1 = w_1^{-n} \quad (4.11b)$$

$$m_1 = 1 + E(1, 1, 0)(f_1 - 1) \quad (4.11c)$$

$$t_1 = \Delta t \quad (4.11d)$$

Uvažujme tři důležité situace:

- (i) Počáteční stav trhu, který označíme jako  $E=E_i$ , za podmínky, že  $pm < C$
- (s) Stav nasycení trhu, kdy  $E=E_s$  za podmínky, že  $pm < C$  a  $p_c < p$
- (c) Stav konkurenceschopnosti trhu, který definujeme jako  $E=E_c$  za podmínky, že  $p_c > p$ .

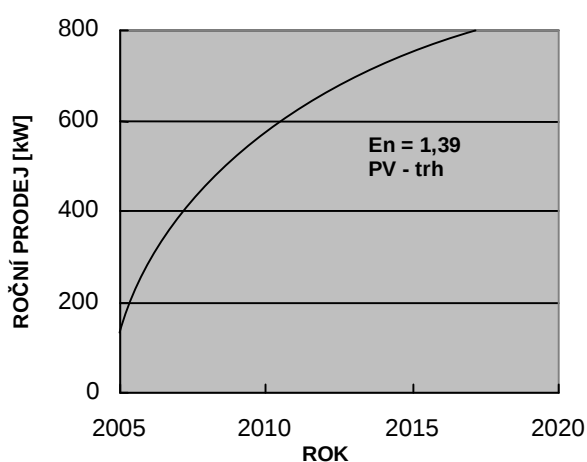
Indexy  $i, s, c$  označují počáteční stav, stav nasycení a konkurenceschopný stav trhu. Počáteční stav  $E=E_i$  předpokládá, že počáteční cena výrobku  $p$  je větší než cena konkurenceschopného výrobku  $p_c$  na trhu a kapitál  $pm$  (peníze  $p$  na výrobu daného množství  $m$ ) je limitován hodnotou  $C$ .

Ve stavu nasycení trhu  $E=E_s$  hodnota kapitálu  $pm$  překračuje investiční kapitál  $C$  a ve stavu konkurenceschopnosti trhu  $E=E_c$  jsou ceny PV modulů a TS kolektorů konkurenceschopné (například s konvenčními zdroji výroby elektrické energie a tepla).

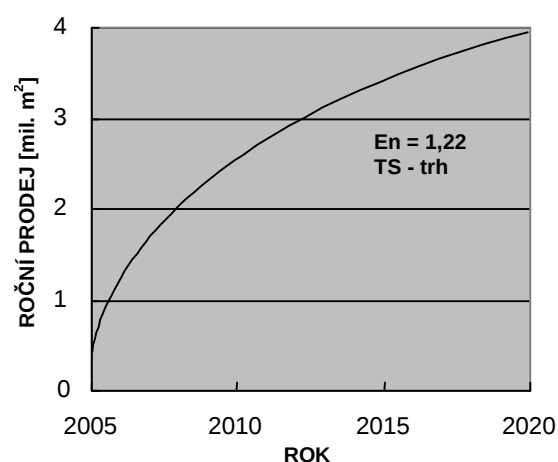
Vypočtené parametry modelu variabilní elasticity uvádíme v tab. 4.1; na obr. 4.6a (PV-trh) a obr. 4.6b (TS-trh) prezentujeme extrapolace prodeje, na obr. 4.7a (PV-trh) a obr. 4.7b (TS-trh) odhad cen do roku 2020.

Tab. 4.1 Parametry modelu variabilní elasticity pro trh PV modulů a TS kolektorů

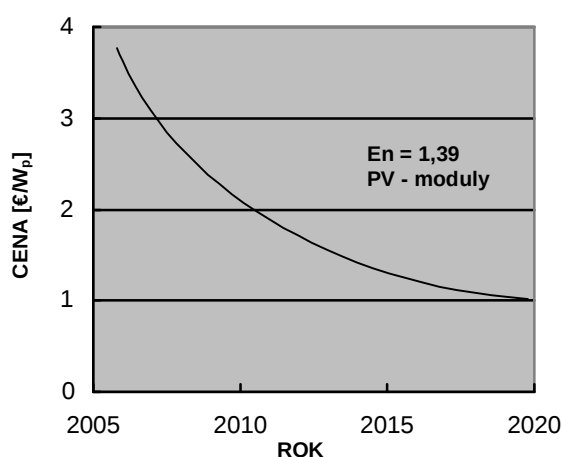
| Statistika | $n$   | $nE_i$ | $nE_s$ | $nE_c$ | $C(\text{EURO})$ | $p_c/p_o$ |
|------------|-------|--------|--------|--------|------------------|-----------|
| PV         | 0,272 | 1,39   | 0,50   | 8      | $5 \times 10^9$  | 0,40      |
| TS         | 0,138 | 1,22   | 0,25   | 4      | $2 \times 10^9$  | 0,45      |



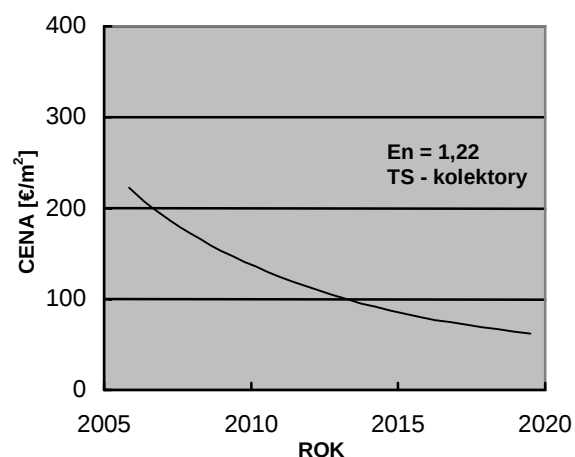
Obr. 4.6a Extrapolace prodeje PV modulů



Obr. 4.6b Extrapolace prodeje TS kolektorů



Obr. 4.7a Extrapolace cen PV modulů



Obr. 4.7b Extrapolace cen TS kolektorů

#### 4.4. Zobecněný model

Modelová reprezentace trhu s obnovitelnými energiemi pro celosvětové prodeje fotovoltaických (PV) modulů a termosolárních (TS) kolektorů od roku 1990 vychází z exponenciálního růstu s ročním přírůstkem 39,8 % (PS) a 16,5 % (TS). Analýza údajů vycházející z tohoto jednoduchého modelu exponenciálního růstu umožnila získat první hrubé odhady parametrů tohoto trhu, tedy kumulativní prodeje a ceny a extrapolovat je do reálné budoucnosti.

Realističtější modelová představa PV+TS trhu vychází z ekonomických modelů nabídky a poptávky. V modelu konstantní elasticity poptávky, kdy parametr elasticity  $E$  představuje konstantní procentuální růst trhu v závislosti na parametru redukce ceny  $n$ , je dosažena nejlepší shoda údajů pro hodnoty  $nE=1,39$  (PV) a  $nE=1,22$  (TS). Model konstantní elasticity dobře popisuje data v případě, že dochází ke zpomalení (nebo zrychlení) růstu a umožňuje vylepšit odhady množství prodeje a cen (3,5 EURO/W<sub>p</sub> pro PV moduly a 215 EUR/m<sup>2</sup> pro TS kolektory).

Pro hodnoty  $nE>1$  může dojít k prudké expanzi trhu, kterou již nebude možné popsat pouze konstantním parametrem elasticity. Proto v rámci modelu variabilní elasticity poptávky uvažujeme elasticitu jako funkci různých proměnných, která v různých časových fázích trhu (počáteční, nasycený, konkurenceschopný) rovněž závisí na kapitálové přiměřenosti  $C$ . Modelová představa založená na variabilitě elasticity umožňuje na základě dat určit prodeje, ceny, ale též i kapitálovou přiměřenost a to s vysokou přesností dohadů (viz tab. 4.1). Model variabilní elasticity lze použít pro věrohodnou předpověď vývoje trhu s obnovitelnými energiemi PV+ST do roku 2020, můžeme odhadnout celkové kumulativní prodeje a cenové relace. Jak lze určit z parametrů tohoto modelu (viz tab.4.1), prodeje PV modulů do roku 2020 vzrostou téměř 8 krát (ve srovnání s rokem 2007), přičemž ceny se sníží z 3,50 EUR/W<sub>p</sub> na 1,375 EUR/W<sub>p</sub>. Prodeje ST kolektorů do roku 2020 vzrostou 4 krát (ve srovnání s rokem 2007), do roku 2013 dosáhnou 3 mil. m<sup>2</sup> a do roku 2020 téměř 4 mil. m<sup>2</sup>, přičemž cena z 215 EUR/m<sup>2</sup> se do roku 2020 sníží na pouhých 95 EUR/m<sup>2</sup>.

Zobecněný model zavádí kapitál jako funkci závislé na času  $C_s = C_s(t)$  a to vzhledem k prosté skutečnosti odrážející ekonomickou realitu trhu, kdy kapitálová přiměřenost se s časem mění. Obvykle lze s dobrou aproximací předpokládat lineární růst kapitálu s časem, který lze popsat vztahem

$$C_s(t) = C_{so}(1 + kt) \quad (4.12)$$

ve kterém index představuje daný stav  $s$ , je  $C_{so}$  představuje základní kapitál a  $k$  je koeficient nárůstu (v jednotkách času). Tento předpoklad časové závislosti kapitálu do zobecněného modelu zavádí inflaci, jejíž mírou je právě koeficient  $k$  ( $rok^{-1}$ ). Z ekonomického hlediska je zřejmé, že započtení inflace do realistického ekonomického modelu je nutností; s inflací se musí počítat v krátkodobém i dlouhodobém horizontu při sestavování nejenom modelů trhu ale též reálných projektů připravovaných pro praxi (v tomto případě se jedná například o projekty výstavby fotovoltaických elektráren).

Opět rozlišíme tři důležité případy, kdy

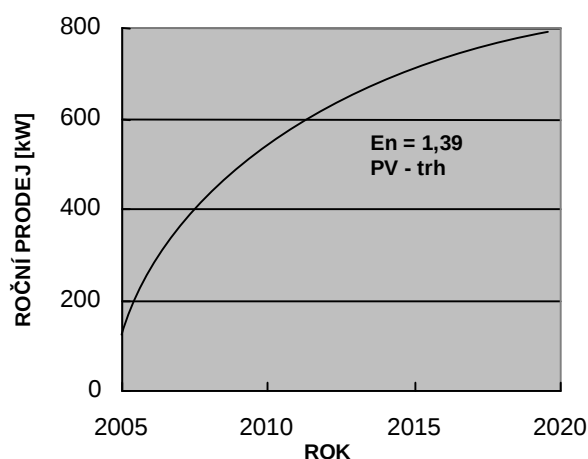
(i) máme počáteční stav trhu  $E=E_i$  za podmínky, že  $pm < C_s(t)$ ;

(s) máme stav nasycení trhu, kdy  $E=E_s$  za podmínky, že  $pm < C_s(t)$  a  $p_c < p$ ;

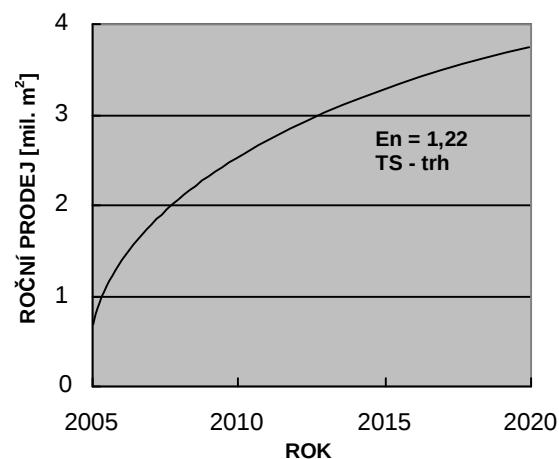
(c) máme stav konkurenceschopnosti trhu, kdy  $E=E_c$  a  $p_c > p$ .

Indexy  $i, s, c$  označují počáteční stav, stav nasycení a konkurenceschopný stav trhu. Počáteční stav  $E=E_i$  předpokládá, že počáteční cena výrobku  $p$  je větší než cena konkurenceschopného výrobku  $p_c$  na trhu a kapitál, což je součin  $pm$  (peníze  $p$  na výrobu daného množství  $m$ ), je limitován časově závislou lineární "kapitálovou" funkcí  $C_s(t)$ , definovanou vztahem (4.12).

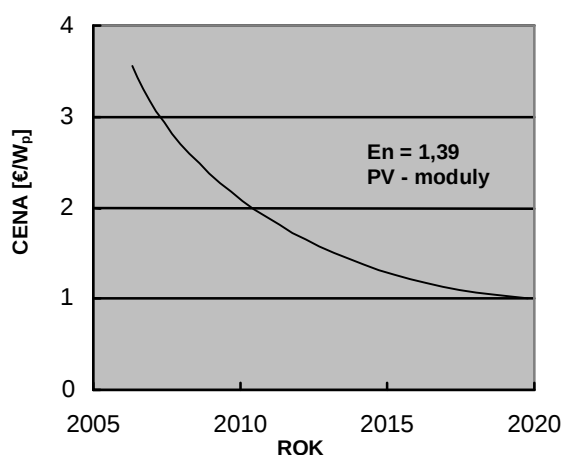
Vypočtené parametry zobecněného modelu uvádíme v tab. 4.2. Na obr. 4.8a (PV-trh) a obr. 4.8b (TS-trh) prezentujeme extrapolace prodeje do roku 2020; odhad cen do roku 2020 pak na obr.4.9a (PV-trh) a obr. 4.9b (TS-trh) .



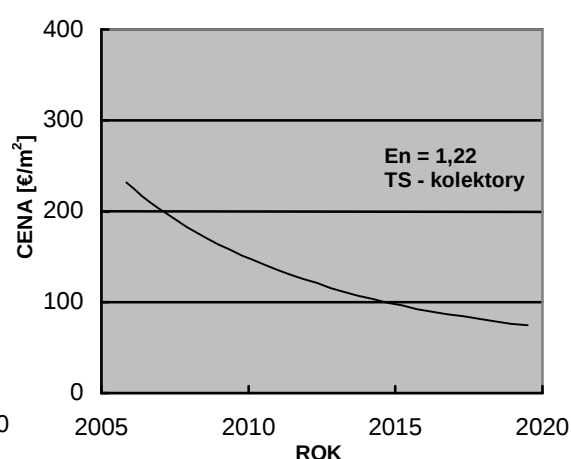
Obr. 4.8a Extrapolace prodeje PV modulů



Obr. 4.8b Extrapolace prodeje TS kolektorů



Obr. 4.9a Extrapolace cen PV modulů



Obr. 4.9b Extrapolace cen TS kolektorů

Tab. 4.2 Parametry zobecněného modelu pro trh PV modulů a TS kolektorů

| Statistika | $n$   | $nE_i$ | $nE_s$ | $nE_c$ | $C_{so}(EURO)$  | $p_c / p_o$ | $k \text{ (rok}^{-1}\text{)}$ |
|------------|-------|--------|--------|--------|-----------------|-------------|-------------------------------|
| PV         | 0,138 | 1,39   | 0,55   | 8,4    | $5 \times 10^9$ | 0,42        | 0,395                         |
| TS         | 0,272 | 1,22   | 0,30   | 4,5    | $2 \times 10^9$ | 0,50        | 0,198                         |

Jak vidno z prezentovaných výsledků, které jsou ilustrovány na příslušných extrapolacích, poskytuje zobecněný model reálné odhady množství prodeje a cen na trhu s obnovitelnými energiemi. Tyto výsledky detailně diskutujeme v kapitole 6, která se zabývá modelovými prognózami na trhu s obnovitelnými energiemi. V následujícím odstavci této kapitoly ukážeme příklady použití získaných parametrů z ekonomických modelů popsaných výše pro reálné výpočty projektů na získávání obnovitelných energií a to v těchto nejtypičtějším případech použití:

- Fotovoltaické zařízení o instalovaném výkonu v rozsahu 1,375 až 6,875 kW na střeše rodinného domu
- Termosolární ohřev o instalovaném výkonu v rozsahu 0,350 až 1,160 kW na střeše rodinného domu
- Fotovoltaická elektrárna o instalovaném výkonu 1,204 MW na území jihočeského kraje [27].

#### 4.5. Aplikace modelových parametrů

Pro instalaci **fotovoltaického zařízení** na střeše rodinného domu jsou důležité jak fyzikální parametry (plocha potřebná k instalaci zařízení, instalovaný výkon a množství vyrobené energie za rok, které závisí na klimatických podmínkách – doba slunečního osvětlení za rok v daném regionu), tak i ekonomické parametry (pořizovací náklady na instalaci, tržby za vyrobenou elektrickou energii a návratnost investice). Tyto parametry shrnujeme v tab. 4.5 pro instalovaný výkon v rozsahu 1,375 až 6,875 kW; ekonomické parametry byly vypočteny na základě získaných odhadů modelu (zobecněný model) s odhadem současných cen periferních zařízení (měniče střídavého proudu na stejnosměrný, ap.) za současných cenových relací (1 EUR = 26 Kč), kdy lze odvodit reálnou cenu 170 Kč za instalovaný watt. Pochopitelně při kalkulacích nelze přihlídnout k ostatním vícenákladům (úpravy střešní plochy, instalace speciálních konstrukcí a podobně). Pro výpočet tržeb za vyrobenou elektřinu jsme použili cenu stanovenou na rok 2009 ERÚ ČR (12,79 Kč/kWh).

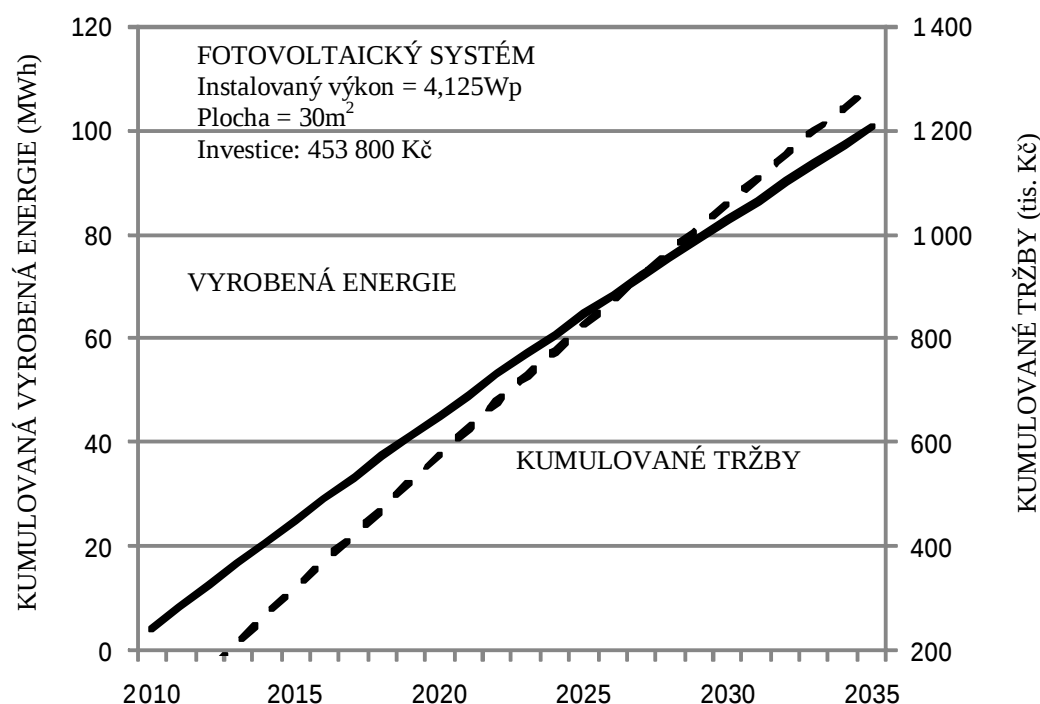
Tab. 4.3 Výpočty ekonomických veličin na základě získaných modelových parametrů pro instalovaný výkon fotovoltaického zařízení (PV-moduly) v rozsahu 1,375-6,875 kW

| Plocha (m <sup>2</sup> ) | Instalovaný výkon (kW) <sup>1)</sup> | Náklady na instalaci (Kč) <sup>2)</sup> | Vyrobena energie za rok (kWh) <sup>3)</sup> | Tržby za vyrobenou energii za rok (Kč) <sup>4)</sup> | Návratnost investice v letech <sup>5)</sup> |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 10,0                     | 1,375                                | 160 800                                 | 1 420                                       | 18 380                                               | 9,64                                        |
| 14,5                     | 2,000                                | 234 000                                 | 2 060                                       | 26 650                                               | 9,56                                        |
| 20,0                     | 2,750                                | 321 800                                 | 2 842                                       | 36 780                                               | 9,48                                        |
| 21,8                     | 3,000                                | 330 000                                 | 3 093                                       | 40 000                                               | 9,38                                        |
| 30,0                     | 4,125                                | 453 800                                 | 4 262                                       | 55 150                                               | 9,26                                        |
| 50,0                     | 6,875                                | 756 200                                 | 7 100                                       | 91 880                                               | 9,14                                        |

**Poznámky k tabulce**

- 1) Při ceně 170 Kč / Watt (6,5 +/- 0,15 EUR / Watt) není přihlídnuto ke speciálním vícenákladům (např. k úpravě střechy, instalaci speciálních konstrukcí, software a podobně)
- 2) Údaje pro klimatické podmínky v ČR, doba slunečního osvětlení 980-1080 kWh/m<sup>2</sup> za rok, měřeno ve výšce 271m nad mořem (údaje ČHMÚ)
- 3) Garantovaná výkupní cena fotovoltaické elektřiny v ČR v roce 2009 je 12,79 Kč / kWh
- 4) Maximální náklady na instalaci 6 kW nepřekročí 700 000 Kč
- 5) S přihlédnutím k poklesu výkonu v průběhu použití

Z uvedených údajů v tab. 4.3 je zřejmé, že pořízení “domácí” fotovoltaické elektrárny na střeše rodinného domu je sice záležitostí nákladnou (na instalaci o výkonu 4 kW je třeba asi půl milionu korun), ale při státem garantovaných výkupních cenách solární elektřiny má návratnost maximálně do deseti let. Přitom fotovoltaické panely fungují nejméně 25 let (minimální záruka výrobce) až 50 let. Na obr. 4.10 ilustrujeme závislost kumulovaného množství vyrobené solární elektřiny fotovoltaickým zařízením o instalovaném výkonu 4,125 W (na ploše 30 m<sup>2</sup>) v prvních 25 letech použití, a to s přihlédnutím k poklesu výkonu fotovoltaických panelů v průběhu tohoto časového období (0,75 % ročně); zde rovněž prezentujeme i kumulované tržby za elektřinu v tomto časovém období s přihlédnutím ke garantovanému cenovému nárůstu (2 % ročně) výkupu fotovoltaické elektřiny. Jak je vidět z obr. 4.3, toto instalované fotovoltaické zařízení je po dobu užívání 25 let schopno vyprodukovat minimálně 100 tisíc kWh elektrické energie a za tuto dobu dosáhnout kumulovaných tržeb minimálně 1.2 milionů Kč při počáteční investici zhruba 0,45 mil. Kč.



Obr. 4.10 Kumulované množství solární energie vyrobené fotovoltaickým systémem o instalovaném výkonu 4,125 Watt a kumulované tržby za uvedené časové období

Pro instalaci zařízení na výrobu teplé užitkové vody (**solární kolektory**) na střechách rodinných domů je rovněž třeba vzít v úvahu dva důležité faktory, kterými

jsou umístění TS-kolektorů a jejich orientace na zdroj slunečního záření (přímo ovlivňuje účinnost celého systému a tím i množství získané tepelné energie), jakož i zeměpisnou polohu (mapa slunečního osvitu). Pro optimální uspořádání v rozsahu obvykle instalovaných výkonů 0,35 až 1,16 kW jsme opět vypočítali příslušné ekonomické veličiny s ohledem na současné cenové relace, kdy na základě určených cen TS-kolektorů ze zobecněného modelu lze odvodit celkovou reálnou cenu instalace 240 Kč za watt (při modelové kalkulaci opět nebereme v úvahu vícenáklady na úpravu střechy ap.) a výsledky sumarizujeme v tab. 4.4. Kumulovanou vyrobenou tepelnou energii a roční energetickou úsporu pro systém o instalovaném výkonu 0,7 kW (na ploše 12 m<sup>2</sup>), který představuje optimální systém šesti TS-kolektorů, každý o ploše 2 m<sup>2</sup> spojených se zásobníkem teplé užitkové vody objemu 500 litrů, prezentujeme na obr. 4.11.

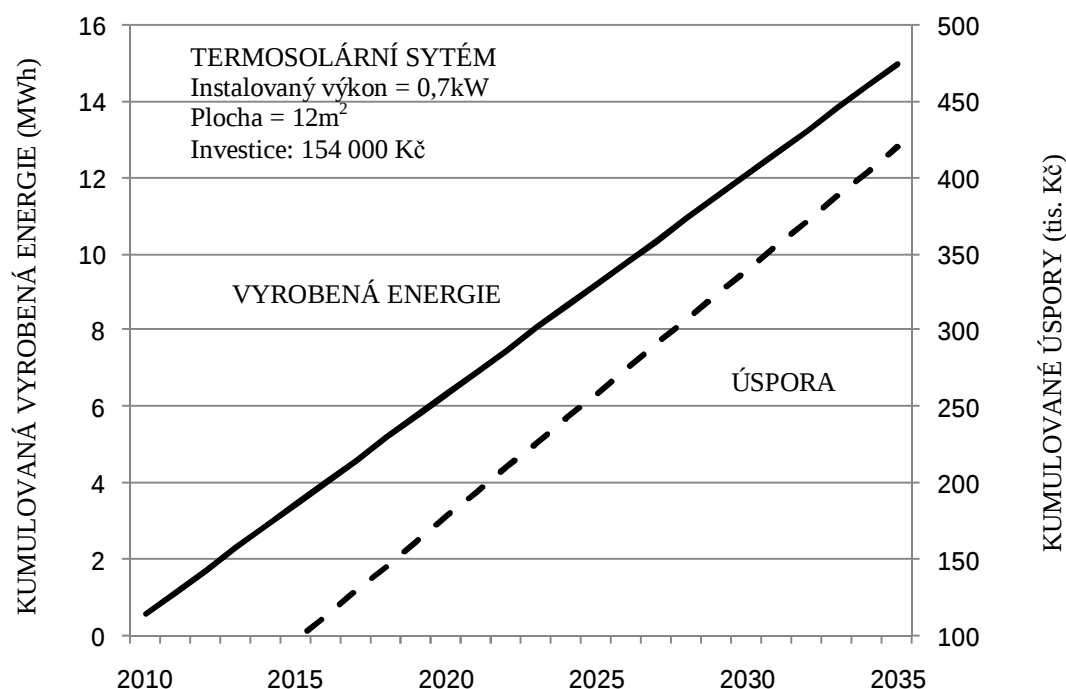
Z uvedených výsledků je zřejmé, že optimální sestavu na ohřev teplé užitkové vody lze pořídit již v rozumných cenových relacích a to v rozsahu 85 až 250 tisíc Kč (vstupní investice) a přitom dosáhnout energetické úspory 8400 až 28000 Kč za rok, což může představovat až 23 % nákladů domácností na roční spotřebu tepla (podrobně diskutujeme v kap. 5 a 6). Jak vidno z obr. 4.11, tento instalovaný systém termosolárních kolektorů je po dobu reálného užívání 25-ti let schopen vyrobit až 15 tisíc kWh tepelné energie a za tuto dobu dosáhnout energetických úspor na spotřebu tepla domácnosti až 420 tisíc Kč při počáteční investici zhruba 150 tisíc Kč.

Tab. 4.4 Výpočty ekonomických veličin na základě získaných modelových parametrů pro instalovaný výkon zařízení na termosolární ohřev (TS-kolektory) v rozsahu 0.35-1,16 kW

| Plocha (m <sup>2</sup> ) | Instalovaný výkon (kW) <sup>1)</sup> | Náklady na instalaci (Kč) <sup>2)</sup> | Vyrobená energie za rok (kWh) | Energetická úspora za rok (Kč) <sup>3)</sup> | Návratnost investice v letech |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|
| 6,0                      | 0,350                                | 84 000                                  | 300                           | 8 400                                        | 10,00                         |
| 8,0                      | 0,460                                | 110 000                                 | 400                           | 11 200                                       | 9,80                          |
| 10,0                     | 0,580                                | 132 000                                 | 500                           | 14 000                                       | 9,40                          |
| 12,0                     | 0,700                                | 154 000                                 | 600                           | 16 800                                       | 9,20                          |
| 16,0                     | 0,920                                | 204 000                                 | 800                           | 22 400                                       | 9,10                          |
| 20,0                     | 1,160                                | 250 000                                 | 1 000                         | 28 000                                       | 9,00                          |

**Poznámky k tabulce:**

- 1) Při ceně 240 Kč / Watt (9,25 +/- 0,25 EUR / Watt) není přihlédnuto ke speciálním vícenákladům (např. k úpravě střechy, instalaci speciálních konstrukcí, software a podobně)
- 2) Údaje pro klimatické podmínky v ČR, doba slunečního osvitu 980-1080 kWh/m<sup>2</sup> za rok, měřeno ve výšce 271 m nad mořem (údaje ČHMÚ)
- 3) Maximální náklady na instalaci 1,2 kW nepřekročí 250 000 Kč

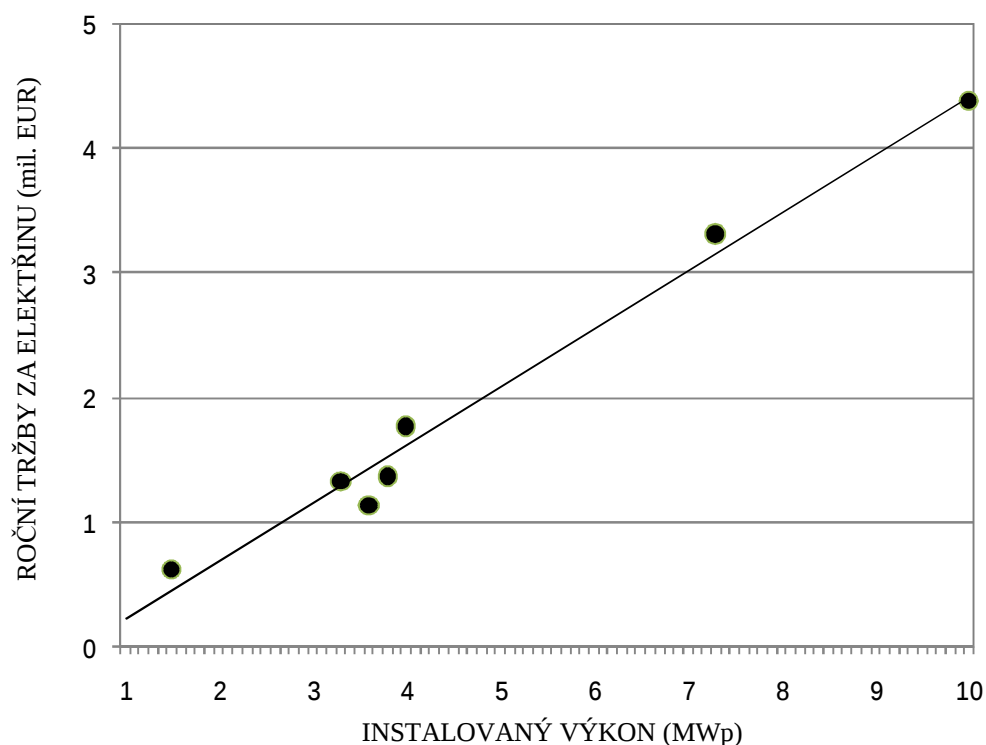


Obr. 4.11. Kumulované množství tepelné energie vyrobené termosolárním systémem (TS-kolektory) o instalovaném výkonu 0,7 kW

V následující aplikaci modelových parametrů na reálný fotovoltaický projekt se budeme zabývat srovnáním efektivity malých fotovoltaických elektráren umístěných na střeších rodinných domů s **fotovoltaickým zařízením o instalovaném výkonu přibližně 1 MWatt, určeným k výrobě solární energie pro centrálního energetického distributora** sloužícího k zásobování elektrickou energií až 250 domácností. Toto je, z hlediska financování (potřebná investice řádově 100 mil.Kč) jeden z nejeftivnějších fotovoltaických projektů, kdy na ploše zhruba 8 až 10 tisíc m<sup>2</sup> lze optimálně instalovat výkon jednoho MW (5000 kusů fotovoltaických panelů, každý o výkonu 200 kW), přičemž lze optimalizovat “vedlejší” náklady na mechanickou instalaci PV-panelů, náklady na instalaci konvertorů stejnosměrného (24V nebo 36V) na střídavé (220V) napětí a podobně. Investiční náklady pro jednu domácnost by se tak snížily zhruba o 10 až 12 % , v našem případě ze 450 tisíc na 400 tisíc Kč.

V tab. 4.5 uvádíme modelové výpočty pro případ “standardní” domácí fotovoltaické elektrárny o instalovaném výkonu 4 kW a v tab. 4.6. pak “průmyslový” projekt výstavby klasické fotovoltaické elektrárny (reálný projekt Ladrná I., jižní Čechy) [27] o instalovaném výkonu 1,204 MW. V případě průmyslové fotovoltaické elektrárny lze projekt, na nějž je potřebná vstupní investice téměř 111 mil. Kč,

zaplatit do deseti let; dalších patnáct let zařízení vyprodukuje zisk ve výši téměř 120 mil. Kč. Přitom lze využít klasického bankovního úvěrování za obvyklých podmínek financování.



Obr. 4.12 Roční tržby za solární elektřinu v závislosti na instalovaném výkonu PV-zařízení

Tab. 4.5 Výpočty ekonomických veličin na základě modelových parametrů pro instalovaný výkon 4 kW

| Domácnost                                  | Kč'000 | 2009        | 2014        | 2019      | 2024       | 2028       |
|--------------------------------------------|--------|-------------|-------------|-----------|------------|------------|
| <b>PŘÍJMY</b>                              |        |             |             |           |            |            |
| Průměrná doba osvitů (v ČR 1400-1700 hod.) | hod    | 1,320       | 1,320       | 1,320     | 1,320      | 1,320      |
| Výkon elektrárny                           | kWh    | 4           | 4           | 4         | 4          | 4          |
| Účinnost elektrárny                        | %      | 78.0%       | 78.0%       | 78.0%     | 78.0%      | 78.0%      |
| Výroba elektřiny                           | kWh    | 3,604       | 3,604       | 3,604     | 3,604      | 3,604      |
| Koeficient poklesu výkonu solárních článků | %      |             | 96%         | 91%       | 87%        | 83%        |
| Výroba elektřiny na prodej                 | kWh    |             | 3,462       | 3,292     | 3,131      | 3,007      |
| Cena vykupované elektřiny (1 kWh)          | Kč     | 12.79       | 14.12       | 15.59     | 17.21      | 18.63      |
| <b>Investice / Tržby za elektřinu</b>      | '000   | <b>-500</b> | <b>49</b>   | <b>51</b> | <b>54</b>  | <b>56</b>  |
| <b>IRR</b>                                 |        | 7.5%        |             |           |            |            |
| <b>Splácení investice</b>                  |        |             | <b>-260</b> | <b>-9</b> | <b>256</b> | <b>477</b> |

Tab. 4.6 Výpočty ekonomických veličin na základě získaných modelových parametrů pro instalovaný výkon 1,204 MWatt fotovoltaického zařízení (projekt Greeninvest a.s.: „Ladná I“, jižní Čechy [27])

| <b>Průmysl</b>                                | <b>Kč'000</b> | <b>2009</b>    | <b>2014</b>   | <b>2019</b>   | <b>2024</b>   | <b>2028</b>    |
|-----------------------------------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| <b>PŘÍJMY</b>                                 |               |                |               |               |               |                |
| Průměrná doba osvitu (v ČR 1400-1700 hod.)    | hod           | 1,320          | 1,320         | 1,320         | 1,320         | 1,320          |
| Výkon elektrárny                              | kWh           | 1,204          | 1,204         | 1,204         | 1,204         | 1,204          |
| Účinnost elektrárny                           | %             | 78.0%          | 78.0%         | 78.0%         | 78.0%         | 78.0%          |
| Koeficient poklesu výkonu solárních článků    | %             |                | 96%           | 91%           | 87%           | 83%            |
| Výroba elektřiny na prodej                    | kWh           |                | 1,190,313     | 1,131,976     | 1,076,498     | 1,034,079      |
| Cena vykupované elektřiny (1 kWh)             | Kč            | <b>12.79</b>   | <b>14.12</b>  | <b>15.59</b>  | <b>17.21</b>  | <b>18.63</b>   |
| <b>Tržby za elektřinu</b>                     | <b>'000</b>   | <b>0</b>       | <b>16,809</b> | <b>17,649</b> | <b>18,530</b> | <b>19,268</b>  |
| <b>CAPEX</b>                                  |               | <b>110,900</b> |               |               |               |                |
| <b>Odpisy</b>                                 |               |                |               | <b>22,180</b> |               |                |
| Osobní náklady (ostraha)                      |               |                | 137           | 159           | 184           | 207            |
| Mzdy                                          |               |                | 101           | 117           | 136           | 153            |
| Sociální a zdravotní pojištění                |               |                | 35            | 41            | 48            | 54             |
| <b>Osobní náklady celkem</b>                  |               |                | <b>159</b>    | <b>213</b>    | <b>286</b>    | <b>363</b>     |
| Pronájem pozemků                              |               | 125            | 500           | 500           | 500           | 500            |
| Pojištění                                     |               |                | 315           | 365           | 424           | 477            |
| Opravy a udržování                            |               |                | 563           | 652           | 756           | 851            |
| Ostatní náklady                               |               |                | 394           | 457           | 529           | 596            |
| Daně a poplatky                               |               |                | 6             | 7             | 8             | 9              |
| <b>Ostatní náklady celkem</b>                 |               | <b>125</b>     | <b>1,777</b>  | <b>1,981</b>  | <b>2,217</b>  | <b>2,432</b>   |
| <b>EBIT</b>                                   |               | <b>-125</b>    | <b>14,873</b> | <b>15,455</b> | <b>16,027</b> | <b>16,473</b>  |
| Úroky investiční úvěr                         |               | 1,220          | 3,427         | 1,316         |               |                |
| Úroky provozní úvěr                           |               | 237            |               |               |               |                |
| Poplatky za uzavření úvěrů                    |               | 528            |               |               |               |                |
| <b>Finanční náklady celkem</b>                |               | <b>1985</b>    | <b>3427</b>   | <b>1316</b>   |               |                |
| <b>VH před zdaněním</b>                       |               | <b>-2,110</b>  | <b>11,446</b> | <b>14,139</b> | <b>16,027</b> | <b>16,473</b>  |
| Základ daně z příjmu (pr.hosp.výsl. - odpisy) |               | 90             | 11,446        | -8,041        | 16,027        | 16,473         |
| Upravený základ daně z příjmu                 |               | 90             | 11,446        | -8,041        | 16,027        | 16,473         |
| Kumulovaný HV před zdaněním (od r. 2015)      |               |                |               | -45,823       | 32,060        | 97,287         |
| Splatná daň z příjmu                          |               |                |               |               | 3,205         | 3,295          |
| <b>Čistý zisk</b>                             |               | <b>-2,110</b>  | <b>11,446</b> | <b>14,139</b> | <b>12,822</b> | <b>13,178</b>  |
| Splátky investičního úvěru                    |               |                | 6,689         | 8,800         |               |                |
| <b>Investice / CF na investovaný kapitál</b>  |               | <b>-26,490</b> | <b>4,757</b>  | <b>5,339</b>  | <b>12,822</b> | <b>13,178</b>  |
| <b>IRR</b>                                    |               | <b>19.3%</b>   |               |               |               |                |
| <b>Splácení investice</b>                     |               |                | <b>-4,586</b> | <b>20,946</b> | <b>69,530</b> | <b>121,712</b> |

Realizované projekty fotovoltaických elektráren o instalovaném výkonu 1-10 MW umožňují výrobu solární elektřiny v řádu jednotek až desítek gigawatthodin ročně. V tab. 4.7 srovnáváme vypočtené ekonomické veličiny pro největší instalované fotovoltaické elektrárny ve světě o výkonu 1,4 až 10 MW (poslední fotovoltaické elektrárna o výkonu 10 MW byla uvedena do provozu teprve nedávno ve Spojených arabských emirátech). Investiční náklady se pohybují kolem 6 EUR na 1 Watt instalovaného výkonu, roční tržby rostou lineárně s instalovaným výkonem (obr. 4.12). Návratnost investic je v rozmezí 9,5 až 16 let s výjimkou elektrárny v Tusconu, USA, kde ovšem byly zjištěny vysoké pořizovací náklady.

Tab. 4.7 Ekonomické parametry fotovoltaické elektrárny výkonu 1,4 až 10 MW

| Projekt                           | Instalovaný výkon (MW) | Vyrobená energie (MWh / rok) | Tržby za elektřinu (mil. EUR za rok) | Investiční náklady (mil. EUR) | Návratnost investice (v letech) | Provozní náklady (tis. EUR / rok) |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Saarbrücken SRN (Sársko)          | 1,4                    | 1 372                        | 0,628                                | 7,22                          | 11,5                            | 54                                |
| Serre Itálie (Sicílie)            | 3,3                    | 3 427                        | 1,331                                | 21,93                         | 16,5                            | 128                               |
| Tucson USA (Arizona)              | 3,8                    | 3 815                        | 1,138                                | 22,75                         | 20,0                            | 161                               |
| Rancha Secco USA (Kalifornie)     | 3,9                    | 3 998                        | 1,369                                | 22,76                         | 16,6                            | 180                               |
| Hernau SRN (Bavorsko)             | 4,0                    | 3 886                        | 1,775                                | 23,39                         | 13,1                            | 200                               |
| Gottelborn SRN (Sársko)           | 7,4                    | 7 252                        | 3,312                                | 39,70                         | 12,0                            | 254                               |
| Abu Dhabí Spojené arabské emiráty | 10,0                   | 19 406                       | 4,379                                | 41,60                         | 9,5                             | 109                               |

V posledních letech se uvažuje o fantastickém projektu **instalace obří fotovoltaické elektrárny na saharské poušti** o rozměrech 100 x 100 km<sup>2</sup>. Vyrobená elektrická energie z této fotovoltaické elektrárny by byla schopna pokrýt spotřebu elektrické energie v Evropě díky příznivým podmínkám největší intenzity slunečního záření na světě. Na ploše 10-ti tisíc kilometrů čtverečních by bylo možné umístit zařízení o výkonu 1500 GW a dosáhnout tak energetického přínosu až 4.226 TWh za rok (viz tab. 4.8). Náklady tohoto projektu lze odhadnout na téměř devět tisíc miliard amerických dolarů (viz tab. 4.8). V Kalifornii se již od konce minulého století připravuje finančně realističtější projekt instalace fotovoltaických panelů na ploše jedné míle čtvereční (2,56 km<sup>2</sup>), kde by bylo možné instalovat fotovoltaické zařízení o výkonu 384 MW a dosáhnout energetického přínosu většího než 1000 GWh za rok; náklady na tento projekt odhadujeme na 2,3 miliardy USD. Mnohem realističtější se ovšem jeví projekty v oblasti instalovaných výkonů desítek MW, a to jak z důvodů technické realizace, tak i z důvodů kapitálové finanční přiměřenosti.

Tab.4.8 Odhad ekonomických parametrů největších fotovoltaických projektů ve světě

| Projekt    | Instalovaný výkon | Plocha                                     | Náklady projektu | Energetický přínos |
|------------|-------------------|--------------------------------------------|------------------|--------------------|
| Abu Dhabí  | 10 MWp            | 66800m <sup>2</sup>                        | 60 mil. USD      | 28 GWh / rok       |
| Kalifornie | 384 MWp           | 2,56km <sup>2</sup> (1 míle <sup>2</sup> ) | 2,3 mld. USD     | 1080 GWh / rok     |
| Sahara     | 1500 GWp          | 10000km <sup>2</sup>                       | 9000 mld. USD    | 4226 TWh/rok       |

## 5. Příspěvek k energetické bilanci

### 5.1. Statistické šetření

V předchozích kapitolách této práce jsme se zabývali analýzou dat, trendů a modelů popisujících kumulativní prodeje fotovoltaických solárních a termálních solárních kolektorů. V obou případech jde o zařízení využívající obnovitelný zdroj energie, tedy slunce, resp. sluneční záření a produkující elektřinu (PV - fotovoltaické moduly) nebo teplo (TS - termosolární kolektory), resp. ohřev teplé užitkové vody. Technologie umožňující výrobu energie (přímá výroba elektřiny a ohřev teplé užitkové vody) ze slunce je známá asi 30-35 let, využívání tohoto zdroje v masovějším měřítku je efektivní od roku 1990. Ke konci roku 2008 tedy existují soubory dat týkající se jak výroby a prodeje fotovoltaických modulů tak i výroby a prodeje termálních kolektorů, a to od roku 1990 do současnosti. Data, publikovaná ve statistických přehledech (ročenkách) vyspělých zemí, využívajících tyto zdroje (USA, Německo, Japonsko), v odborných publikacích (Revue: Renewable Energies (Springer Verlag)) a na různých webových serverech jsme analyzovali z hlediska „exponenciálního“ nárůstu kumulativních prodejů, dále z hlediska ekonomického modelu nabídky a poptávky (konstantní a variabilní model poptávky) a z hlediska zobecněného modelu, který umožňuje provést kvalifikovaný odhad a extrapolaci kumulativních prodejů a ceny výroby elektrické a tepelné energie v peněžních jednotkách (EURO) na jednotku vyrobené energie (kWh). Na základě výsledků modelové parametrizace jsme vypočítali ekonomické veličiny technologických projektů pro instalace fotovoltaických zařízení (na střechách budov a volných plochách), jakož i pro instalace termosolárních zařízení na ohřev teplé užitkové vody pro domácnosti.

V uvažované energetické koncepci (částečné) náhrady klasických zdrojů energie (elektřina a plyn) obnovitelnými energetickými zdroji (jakými jsou zejména fotovoltaické moduly pro přímou výrobu elektřiny ze slunce a termosolární kolektory pro ohřev teplé užitkové vody) patří velmi důležité místo zejména domácnostem, které spotřebovávají jak elektřinu, tak i plyn (vytápění a ohřev teplé užitkové vody) z klasických energetických zdrojů. A právě z tohoto důvodu je třeba provést statistická šetření o spotřebě elektrické energie a plynu v domácnostech (rodinné domy), neboť právě domácnosti představují relevantní zákazníky odběru tzv. ekologické nebo též „zelené“ energie. V ČR relevantní data o spotřebě energie

v domácnostech (rodinné domy a byty) nejsou k dispozici, a to je důvod, pro který jsme se rozhodli provést nezávislé statistické šetření na vzorku vybraných domácností v různých regionech a okresech. V provedeném šetření jsme získali údaje o odběru elektřiny a plynu na poměrně velkém souboru a tento soubor dat (viz přílohy) jsme analyzovali jak z hlediska popisné statistiky, tak i pomocí metod vícerozměrné statistické analýzy. Soubor dat byl získán náhodným výběrem; zatímco zjišťování energetické spotřeby u rodinných domů to nečinilo problém, neboť řada majitelů rodinných domů si vede poměrně podrobné záznamy o spotřebě elektřiny a plynu (přičemž existující data v písemné formě skladují i několik let), bylo získávání dat o spotřebě energií v bytech spojeno s různými obtížemi (řada správců bytových domů si nepřeje zveřejňování jakýchkoli údajů). Vstřícný postoj majitelů a správců domů jsme zaznamenali v několika případech, z nichž jsme náhodně vybrali dva soubory.

Za jeden z hlavních cílů této práce jsme stanovili provést **statistické šetření energetické spotřeby na vybraném souboru rodinných domů a bytů v různých regionech a okresech ČR a provést průzkumovou analýzu získaných statistických dat** za účelem odhadu **určení možného příspěvku obnovitelných energií (fotovoltaika a termosolární ohřev) do celkové energetické bilance.**

### **Rodinné domy**

V tomto statistickém šetření jsme získali data o spotřebě elektrické energie (v kWh) a (zemního) plynu (v m<sup>3</sup>) za rok 2008 od 100 vybraných domácností v 10 regionech ČR: okr. Benešov, okr. Praha-východ, Praha 5-Smíchov, Praha 5-Zličín, Praha 6-Břevnov, Olomouc-město, Olomouc-venkov, Brno-město, Brno-venkov a Karlovy Vary. Byly sledovány tyto údaje:

- spotřeba plynu,
- spotřeba elektrické energie v režimu D49, tedy denní odběr a noční odběr,
- celková spotřeba elektřiny,
- objem obytného prostoru,
- počet obyvatel dané domácnosti a
- instalace venkovního bazénu (pouze alternativní data typu ano-ne).

V rámci časové analýzy byly u jedné z domácností rovněž sledovány spotřeby elektřiny a zemního plynu v jednotlivých měsících za posledních pět let. U deseti

vybraných domácností byly sledovány spotřeby elektrické energie a zemního plynu za posledních 5 let .

Analýza souboru dat byla provedena za účelem:

- posouzení jednotlivých souborů náhodných veličin (týkajících se spotřeby elektřiny ve dvou různých režimech odběrů a spotřeby plynu) z hlediska popisné statistiky
- zjištění možné **vzájemné závislosti** jednotlivých náhodných veličin s cílem určit jejich **korelace** (např. dvou různých odběrných režimů)
- zjištění skutečného **příspěvku jednotlivých komponent** z různých odběrů různých energií do energetické bilance s využitím **metody hlavních komponent a faktorové analýzy** s cílem určit variabilitu a závislost jednotlivých komponent, určit tedy **nekorelované a korelované komponenty (faktory)**
- provedení **analýzy** časových řad za posledních pět let s cílem získat parametry pro možnou extrapolaci dat
- **srovnání dat** získaných z našeho experimentu s existujícími publikovanými daty.

Nejdříve jsme eliminovali odlehlá pozorování (data), a to graficky (qq diagramy pomocí programu STATGRAPHICS) a poté na základě analýzy výběrového Mahalanobisova kritéria. Dále jsme pak pracovali s očištěnými soubory dat, u kterých jsme provedli testy normality; uvedené soubory mají normální rozdělení. V tab. 5.1 jsou uvedeny výsledky odhadů modelu příslušných souborů pro údaje vztažené na jednoho obyvatele (obdobným způsobem jsme určili i statistické veličiny vztažené na 1 m<sup>3</sup> obývaného prostoru).

Tab. 5.1 Statistické veličiny (vztažené na jednoho obyvatele domácnosti) určené na základě odhadů modelu normálního rozdělení spolu s hodnotami testových kritérií  $\chi^2$ , hodnotami KS = Kolmogorov-Smirnov a hodnotami SW = Shapiro-Wilkins

|                              | Spotřeba denní elektřiny (kWh) | Spotřeba noční elektřiny (kWh) | Celková spotřeba elektřiny (kWh) | Spotřeba plynu (m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Průměr                       | 455.62                         | 1,785.79                       | 2,241.41                         | 806.59                           |
| Středná kvadratická odchylka | 215.44                         | 723.97                         | 751.25                           | 310.24                           |
| minimum                      | 166.00                         | 547.00                         | 5,093.00                         | 264.50                           |
| maximum                      | 1,324.00                       | 3,806.50                       | 751.00                           | 1,868.00                         |
| medián                       | 448.85                         | 1,681.75                       | 2,133.05                         | 752.12                           |
| $\chi^2$                     | 0.9731                         | 0.9850                         | 0.9572                           | 0.9695                           |
| KS                           | 0.1024                         | 0.0845                         | 0.0767                           | 0.0922                           |
| SW                           | 0.8864                         | 0.9424                         | 0.9456                           | 0.9494                           |

Z námi získaných souborů jsme určili relevantní statistické ukazatele, jimiž jsou zejména:

- Průměrná spotřeba plynu – ta činila v roce 2008 na jeden rodinný dům **3255 m<sup>3</sup>**; na jednotku obytného objemu 5,04 m<sup>3</sup> a na jednoho obyvatele domácnosti 806 m<sup>3</sup>.
- Průměrná celková spotřeba elektřiny – ta činila v roce 2008 na jednu domácnost **9171 kWh**, na jednotku obývaného objemu 14,20 kWh a na jednoho obyvatele domácnosti 2241 kWh .

Z těchto údajů lze například odvodit, že průměrná česká rodina obývající rodinný dům v roce 2008 za plyn zaplatila **41664 Kč** (včetně paušálních plateb a daně z přidané hodnoty) a za elektřinu (nejrozšířenější sazba D49) celkem **17974 Kč** (včetně paušálních plateb a daně z přidané hodnoty) tedy průměrně 7336 Kč za D=denní sazbu a 10638 Kč za N=noční sazbu.

Zároveň jsme se snažili analyzovat vzájemné závislosti jednotlivých veličin s cílem určit jejich možné korelace, zejména vztah spotřeby elektrické energie ve dvou různých odběrných režimech (denní a noční, nejčastěji používaná sazba D49), vztah těchto režimů k celkové spotřebě, vztah odběrů elektřiny (denní, noční a celkový) k odběru zemního plynu, přičemž jsme vždy odběry energií vztahovali na jednoho obyvatele a též na jednotku obývaného objemu. V případě dvojrozměrného normálního rozdělení, je regresní funkcí přímka určená střední hodnotou a korelační

koeficient (jako parametr tohoto rozdělení) představuje míru jejich lineární závislosti. V tab. 5.2 uvádíme příslušné korelační koeficienty zkoumaných veličin.

Tab. 5.2 Korelační koeficienty náhodných veličin

|                            | Spotřeba denní elektřiny | Spotřeba noční elektřiny | Celková spotřeba elektřiny | Spotřeba plynu |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|
| Spotřeba denní elektřiny   | -                        | 0.4892                   | 0.7173                     | -0.0182        |
| Spotřeba noční elektřiny   | 0.4892                   | -                        | 0.9875                     | 0.0181         |
| Celková spotřeba elektřiny | 0.7173                   | 0.9875                   | -                          | 0.0191         |
| Spotřeba plynu             | -0.0182                  | 0.0181                   | 0.0191                     | -              |

Nízké hodnoty (blíží se téměř k nule) vypočtených korelačních koeficientů v případě zkoumání závislosti spotřeby plynu na elektrických odběrech značí, že jde o nekorelované veličiny, které jsou vzájemně nezávislé. Bylo tedy prokázáno, že spotřeba plynu nezávisí na spotřebě elektřiny v obou režimech (denní a noční) a ani na celkové spotřebě elektřiny. Naproti tomu, vysoký korelační koeficient (blíží se k jedné) ukazuje na velmi silnou přímou lineární závislost odběru v nočním režimu na celkové spotřebě elektřiny. Interakci těchto souborů, tj. „celkový odběr versus noční odběr“ můžeme šetřit z hlediska interakce dvou dominantních jevů, interakci celkového odběru a denního odběru pak z hlediska typu interakce „hlavní versus vedlejší faktor“, k čemuž nás opravňuje poměrně vysoká hodnota vypočítaného korelačního koeficientu. Pro oba tyto typy interakcí jsme zkonstruovali 95% intervaly spolehlivosti. Výsledky uvádíme v tab. 5.3, kdy odhady příspěvků jednotlivých faktorů vstupujících do interakce jsou 24,3 % pro odběr v denním režimu a 75,7 % pro odběr v nočním režimu, což v součtu představuje 100% celkový odběr.

Tab. 5.3 Intervaly spolehlivosti a odhady příspěvků faktorů interakce

| Závislost veličin             | Typ interakce                           | Konfidenční interval na hladině 95% | Příspěvek do intervalu |
|-------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| Celkový noční odběr elektřiny | hlavní faktor<br>vs.<br>hlavní faktor   | <2,97; 3,96>                        | 75.70%                 |
| Celkový denní odběr elektřiny | vedlejší faktor<br>vs.<br>hlavní faktor | <3,13; 12,89>                       | 24.30%                 |

V tab. 5.4 prezentujeme dále vypočtené korelační koeficienty pro dva alternativní soubory dat: kdy je rodinný dům vybavený vnějším bazénem (A = Ano) a kdy není (N = Ne).

Tab. 5.4 Korelační koeficienty pro dva soubory alternativních dat

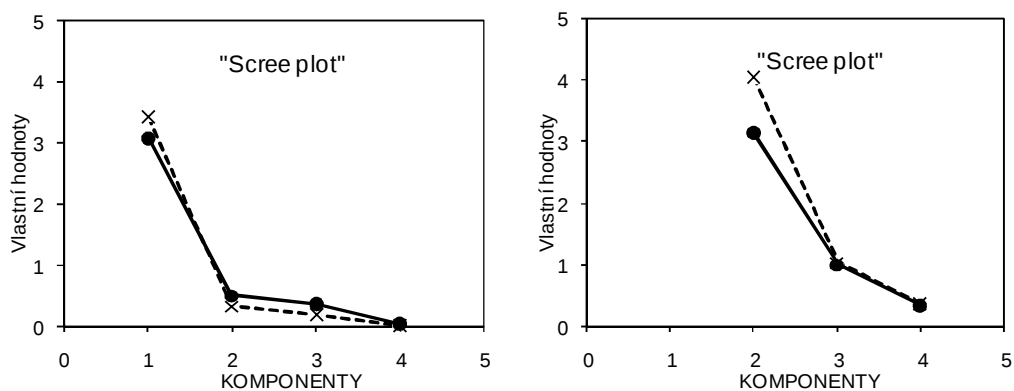
|                             | Vnější bazén<br>A = Ano        |                                | Vnější bazén<br>N = Ne         |                                |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                             | Spotřeba<br>denní<br>elektřiny | Spotřeba<br>noční<br>elektřiny | Spotřeba<br>denní<br>elektřiny | Spotřeba<br>noční<br>elektřiny |
| Spotřeba denní<br>elektřiny | -                              | -0.118                         | -                              | 0.0547                         |
| Spotřeba noční<br>elektřiny | 0.0263                         | -                              | -0.0973                        | -                              |

Nízké hodnoty zjištěných korelačních koeficientů ukazují, že odběry elektřiny v obou režimech jsou nezávislé na alternativě A (kdy má rodinný dům vnější bazén) i na alternativě N (kdy rodinný dům vnější bazén nemá). To znamená, že spotřeba elektřiny nezávisí na tom, zda rodinný dům je vybaven vnějším bazénem; a pokud ano, tento není vytápěn elektřinou.

Rovněž zde prezentujeme relevantní výsledky statistické analýzy šetření našeho vícerozměrného souboru dat pomocí **komponentní a faktorové analýzy** s cílem určit korelovanost jednotlivých zkoumaných veličin (komponent či faktorů) a jejich vzájemnou asociaci s ostatními kategoriemi. Připomínáme, že máme soubor náhodně vybraných dat týkajících se energetické spotřeby různých domácností pro různé odběry energií (elektřiny, plynu) v různých režimech (denní a noční odběr elektřiny). I když v tabulkách a předchozích analýzách uvádíme odběry elektřiny v kWh a odběr plynu v m<sup>3</sup>, lze tato data sjednotit prostým přepočtem spotřeby plynu na kWh (vztahem 1 m<sup>3</sup> = 10,554 kWh), co se týče cenového sjednocení různých odběrů a

sazeb, lze použít přepočty dle cen těchto energií ke konci roku 2008: elektřiny pro noční tarif 1,611 Kč/kWh, elektřiny pro denní tarif 4,436 Kč/kWh a plynu 0,885 Kč/kWh . Sledujeme celkem šest relevantních komponent: spotřebu elektřiny v nočním tarifu, spotřebu elektřiny v denním tarifu, celkovou spotřebu elektřiny, celkovou spotřebu plynu, počet obyvatel dané domácnosti a obytný objem dané domácnosti. Alternativní údaj o existenci (Ano) nebo neexistenci (Ne) venkovního bazénu patřícího k danému rodinnému domu nelze jako komponentu pro tento typ analýzy použít, navíc jsme již prokázali (viz tab. 5.4), že spotřeba energie nezávisí na existenci bazénu a nevstupuje do energetické bilance domácnosti.

Výsledky komponentní a faktorové analýzy představují korelační matice, komponentní matice, rotační komponentní matice a reprodukované korekce, z nichž dedukujeme relevantní údaje pro interpretaci zkoumaných veličin a jejich závislostí. Relevantní výsledky pro 6 komponent sumarizujeme v následující tab. 5.5, z které je zřejmé, že největší vliv mají pouze 4 hlavní komponenty, týkající se spotřeby elektřiny a plynu (ty vysvětlují celkem 98,138 % variability); dvě zbylé komponenty týkající se obytného objemu a počtu obyvatel (představují pouze 1,862 % variability) jsou nevýznamné z hlediska této analýzy. V dalším se tedy zabýváme analýzou významnosti 4 hlavních komponent. Jak je vidět z tab. 5.6, kde uvádíme vlastní hodnoty proměnných získaných komponentní a faktorovou analýzou pro tyto 4 vybrané komponenty a z obr. 5.1, nejvýznamnější komponentou pro energetickou bilanci rodinného domu je spotřeba plynu. Tato komponenta není asociovaná s ostatními komponentami týkající se odběrů elektřiny. Zbylé tři komponenty následně analyzujeme v tab. 5.7 a graficky ilustrujeme na obr. 5.2, kde je zřejmé, že největší vliv má v tomto případě odběr elektřiny v nočním režimu (tzv. nízký tarif). Odběr elektřiny v nočním režimu představuje dominantní příspěvek do celkového odběru elektřiny dané domácnosti.



Obr. 5.1. Komponentní diagram pro 4 a 3 vybrané komponenty (přerušovaná čára je pro komponentní analýzu, plná čára je pro faktorovou analýzu)

Tab. 5.5 Vlastní hodnoty pro čtyři vybrané komponenty

| Komponenty                     | Vlastní hodnoty     |                   |
|--------------------------------|---------------------|-------------------|
|                                | Komponentní analýza | Faktorová analýza |
| (1) Spotřeba plynu             | 3,436               | 3,093             |
| (2) Spotřeba noční elektřiny   | 0,332               | 0,500             |
| (3) Spotřeba denní elektřiny   | 0,210               | 0,372             |
| (4) Celková spotřeba elektřiny | 0,023               | 0,035             |

Tab. 5.6 Vlastní hodnoty pro tři vybrané komponenty

| Komponenty                     | Vlastní hodnoty     |                   |
|--------------------------------|---------------------|-------------------|
|                                | Komponentní analýza | Faktorová analýza |
| (1) Spotřeba noční elektřiny   | 4.046               | 3.156             |
| (2) Spotřeba denní elektřiny   | 1.029               | 1.008             |
| (3) Celková spotřeba elektřiny | 0.367               | 0.346             |

Tab. 5.7 Vlastní hodnoty (komponentní analýza) pro 4 vybrané komponenty v různých časových obdobích ( v letech 2003 až 2007)

| Komponenty                                      | 2003  | 2004  | 2005  | 2006  | 2007  |
|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (1) Spotřeba noční elektřiny                    | 1.955 | 2.026 | 2.119 | 2.567 | 3.054 |
| (2) Spotřeba denní elektřiny                    | 1.471 | 1.479 | 1.237 | 1.123 | 0.878 |
| (3) Celková spotřeba elektřiny                  | 0.575 | 0.496 | 0.644 | 0.310 | 0.068 |
| (4) Celková spotřeba plynu [ $\times 10^{-6}$ ] | 0.002 | 0.009 | 0.001 | 0.003 | 0.001 |

Tab. 5.8 Rotační komponentní matice (pro komponentu = 1) pro 4 vybrané komponenty v různých časových obdobích (v letech 2003 až 2007)

| Komponenty                     | 2003   | 2004  | 2005   | 2006   | 2007   |
|--------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| (1) Spotřeba noční elektřiny   | 0.985  | 0.999 | 0.982  | 0.982  | 0.988  |
| (2) Spotřeba denní elektřiny   | -0.017 | 0.030 | -0.111 | 0.373  | 0.948  |
| (3) Celková spotřeba elektřiny | 0.990  | 0.994 | 0.999  | 0.941  | 0.990  |
| (4) Celková spotřeba plynu     | 0.001  | 0.038 | -0.043 | -0.013 | -0.146 |

Tab. 5.9. Komponentní matice (pro komponentu = 1) pro 4 vybrané komponenty v různých časových obdobích (v letech 2003 až 2007)

| Komponenty                     | 2003   | 2004  | 2005   | 2006   | 2007   |
|--------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| (1) Spotřeba noční elektřiny   | 0.996  | 0.958 | 0.974  | 0.899  | 0.978  |
| (2) Spotřeba denní elektřiny   | -0.102 | 0.254 | -0.458 | 0.834  | 0.974  |
| (3) Celková spotřeba elektřiny | 0.974  | 0.986 | 0.929  | 0.955  | 0.987  |
| (4) Celková spotřeba plynu     | 0.063  | 0.267 | -0.312 | -0.389 | -0.146 |

Další důležitá aplikace komponentní a faktorové analýzy vychází z časových dat, která máme k dispozici: data spotřeby dané domácnosti v jednotlivých měsících daného roku. Dominantní komponentou je spotřeba v nočním režimu, přičemž spotřeby elektřiny a plynu nejsou vzájemně korelovány. Odběr elektřiny není asociován s odběrem plynu v daném měsíci. Tato zjištění korespondují s výsledky prezentované prostřednictvím rotační komponentní matice (tab. 5.8) a komponentní matice (tab. 5.9).

Z komponentní a faktorové analýzy vyplývají tato zjištění:

- různé režimy odběru elektřiny nejsou vzájemně korelované
- celkový odběr elektřiny silně závisí na režimu nočního odběru, který představuje dominantní příspěvek do celkového odběru elektřiny
- celková spotřeba elektřiny a plynu nejsou vzájemně korelované
- celková spotřeba plynu nezávisí na různých režimech odběru elektřiny
- žádná ze čtyř relevantních komponent není závislá na počtu obyvatel ani na jednotce obytného prostoru
- studium časové závislosti čtyř relevantních komponent prokázalo, že celková spotřeba elektřiny není korelovaná s celkovou spotřebou plynu v jednotlivých měsících daného roku.

Rekapitulace výsledků analýzy našeho statistického experimentu, popisujícího energetickou bilanci náhodně vybraného souboru, lze shrnout následovně:

1. **Nebyla prokázána korelace** dvou odběrných režimů („denní“ a „noční“, ani korelace celkové **spotřeby elektřiny s odběrem zemního plynu**. Spotřeba elektřiny není determinována spotřebou zemního plynu a naopak.
2. Naproti tomu **byla prokázána silná závislost celkového odběru elektřiny na odběru v tzv. nočním režimu**. Bylo dále prokázáno, že v interakci těchto dvou veličin je příspěvek odběru v nočním režimu dominantní (75.7%) na celkovém odběru elektřiny.
3. Nebyla prokázána závislost spotřeby elektrické energie na tom, zda-li je nebo není rodinný dům vybaven bazénem (lze z toho usuzovat, že pokud ano, zřejmě není bazén elektricky vyhříván).
4. Z komponentní a faktorové analýzy vyplývá, že čtyři hlavní komponenty (tj. spotřeba plynu, elektřiny v nočním režimu, elektřiny v denním režimu a celková spotřeba elektřiny) **nejsou vzájemně korelovány**, a to ani v jednotlivých měsících daného roku.
5. **Spotřeba elektrické energie** v jednotlivých odběrných režimech (denní, noční, celkový odběr) **je nezávislá na jednotlivých měsících daného roku**.
6. **Spotřeba plynu závisí na jednotlivých měsících daného roku**, vykazuje periodicitu a silnou korelaci s ostatními daty tohoto typu, například GJ tepla dodaných v příslušných jednotlivých měsících daného roku.

## **Byty**

Dále jsme v našem statistickém šetření analyzovali údaje o spotřebě elektrické energie (v kWh) a tepla (v GJ) dodávaného z centrální vytápěcí jednotky pro dva nezávislé bytové satelity: jeden v Praze 5 – Zličín (celkem 38 bytů - soubor č.1) a druhý v Olomouci (celkem 78 bytů – soubor č.2). Byly sledovány tyto údaje:

- Spotřeba tepla
- Spotřeba elektrické energie v režimu D02 (jednotná sazba)
- Plocha obytného prostoru
- Počet obyvatel daného bytu

V rámci časové analýzy byly u jedné z domácností rovněž sledovány měsíční spotřeby elektřiny a tepla v jednotlivých měsících za posledních pět let; u deseti vybraných domácností byly sledovány spotřeby elektřiny a tepla za posledních 5 let.

Analýza souboru dat byla provedena výše použitou a podrobně popsanou metodikou s využitím dvoustupňové shlukové analýzy (popsáno v odst. 3.2), kdy oba statistické soubory byly uvažovány jako dva náhodně nezávislé shluky dat (tab. 5.10a a tab. 5.10b) :

Tab. 5.10a Profily shluků – soubor č.1

| Cluster   | Plocha |                     | Spotřeba elektřiny (kWh/rok) |                     | Spotřeba tepla <sup>1)</sup> (GJ/rok) |                     |
|-----------|--------|---------------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
|           | Průměr | Směrodatná odchylka | Průměr                       | Směrodatná odchylka | Průměr                                | Směrodatná odchylka |
| 1         | 52,780 | 16,869              | 924,440                      | 110,487             | 9887,640                              | 980,787             |
| 2         | 82,870 | 13,156              | 1195,550                     | 361,081             | 11200,000                             | 1024,930            |
| Kombinace | 64,960 | 21,392              | 1034,170                     | 275,082             | 10400,000                             | 1178,435            |

<sup>1)</sup>  $10^6 \text{ W} = 1 \text{ MW} = 3,59 \text{ GJ}$

Tab. 5.10b Profily shluků – soubor č.2

| Cluster   | Plocha |                     | Spotřeba elektřiny (kWh/rok) |                     | Spotřeba tepla <sup>1)</sup> (GJ/rok) |                     |
|-----------|--------|---------------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
|           | Průměr | Směrodatná odchylka | Průměr                       | Směrodatná odchylka | Průměr                                | Směrodatná odchylka |
| 1         | 83,790 | 19,918              | 1278,050                     | 237,459             | 11300,000                             | 1133,907            |
| 2         | 57,020 | 24,764              | 1127,510                     | 157,454             | 9671,250                              | 1438,052            |
| Kombinace | 71,060 | 25,968              | 1206,450                     | 215,847             | 10500,000                             | 1527,861            |

<sup>1)</sup>  $10^6 \text{ W} = 1 \text{ MW} = 3,59 \text{ GJ}$

Z obou shluků jsme určili metodou sdílených vážených průměrů GWSM (odst. 3.2.4) tyto relevantní statistické ukazatele:

- Průměrná spotřeba tepla v roce 2008 na jeden byt byla **10418 GJ**, na jednotku obývací plochy 146,75 GJ a na jednoho obyvatele bytu 4053,72 GJ (pro přepočítání na kWh lze použít vztah  $1 \text{ kW} = 3,59 \cdot 10^{-3} \text{ GJ}$ ).
- Průměrná celková spotřeba elektřiny v roce 2008 na jeden byt byla **4484 kWh**, na jednotku obývané plochy 63,12 kWh a na jednoho obyvatele domácnosti 1744,8 kWh.

Z těchto údajů lze tedy odvodit, že průměrná česká rodina, obývající standardní byt v roce 2008 zaplatila za odběr tepla **16268 Kč** (včetně paušálních plateb a daně z přidané hodnoty) a za elektřinu (pevná sazba D02) **9720 Kč** (včetně paušálních plateb a daně z přidané hodnoty).

Faktorová analýza, kterou jsme použili při zjišťování závislosti jednotlivých komponent, neprokázala vzájemné závislosti (tab. 5.11a a tab. 5.11b). Vlastní hodnoty pro čtyři vybrané komponenty (tab. 5.12a a tab. 5.12b) a příslušné komponentní „scree plot“ diagramy (obr. 5.2) dokládají, že spotřeba elektřiny a spotřeba plynu nejsou závislé na velikosti bytu ani na počtu bydlících.

Tab. 5.11a Korelační matice – soubor č.1

| Komponenty             | (1) Plocha | (2) Počet bydlících | (3) Spotřeba elektřiny | (4) Spotřeba tepla |
|------------------------|------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| (1) Plocha             | 1,000      | 0,711               | 0,661                  | 0,760              |
| (2) Počet bydlících    | 0,711      | 1,000               | 0,433                  | 0,583              |
| (3) Spotřeba elektřiny | 0,661      | 0,433               | 1,000                  | 0,554              |
| (4) Spotřeba tepla     | 0,760      | 0,583               | 0,554                  | 1,000              |

Tab. 5.11b Korelační matice –soubor č.2

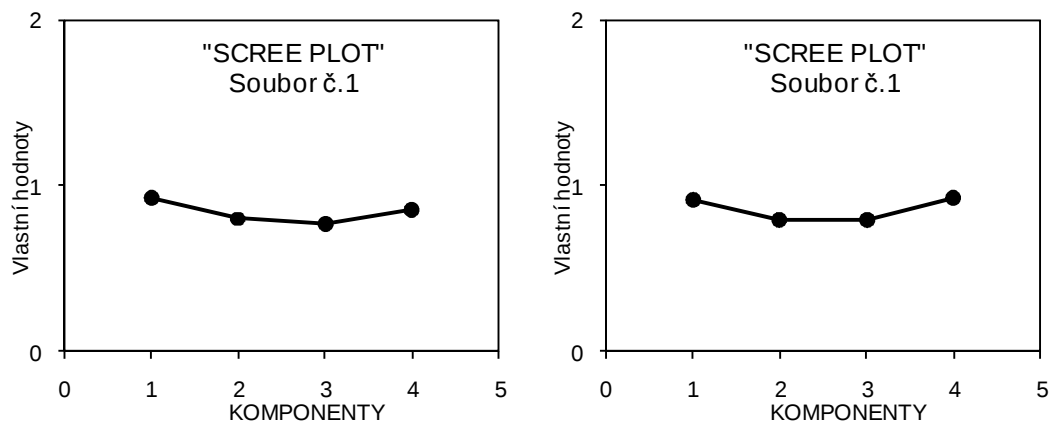
| Komponenty             | (1) Plocha | (2) Počet bydlících | (3) Spotřeba elektřiny | (4) Spotřeba tepla |
|------------------------|------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| (1) Plocha             | 1,000      | 0,617               | 0,630                  | 0,843              |
| (2) Počet bydlících    | 0,617      | 1,000               | 0,479                  | 0,660              |
| (3) Spotřeba elektřiny | 0,630      | 0,479               | 1,000                  | 0,643              |
| (4) Spotřeba tepla     | 0,843      | 0,660               | 0,643                  | 1,000              |

Tab. 5.12a Komponentní matice pro 4 vybrané komponenty – soubor č.1

| Komponenty             | (1) Plocha | (2) Počet bydlících | (3) Spotřeba elektřiny | (4) Spotřeba tepla |
|------------------------|------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| (1) Plocha             | 0,752      | 0,649               | 0,624                  | 0,695              |
| (2) Počet bydlících    | 0,649      | 0,611               | 0,610                  | 0,704              |
| (3) Spotřeba elektřiny | 0,624      | 0,610               | 0,602                  | 0,711              |
| (4) Spotřeba tepla     | 0,695      | 0,704               | 0,711                  | 0,796              |

Tab.5.12b Komponentní matice pro 4 vybrané komponenty – soubor č.2

| Komponenty             | (1) Plocha | (2) Počet bydlících | (3) Spotřeba elektřiny | (4) Spotřeba tepla |
|------------------------|------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| (1) Plocha             | 0,827      | 0,724               | 0,723                  | 0,841              |
| (2) Počet bydlících    | 0,724      | 0,635               | 0,633                  | 0,737              |
| (3) Spotřeba elektřiny | 0,723      | 0,633               | 0,632                  | 0,735              |
| (4) Spotřeba tepla     | 0,841      | 0,737               | 0,735                  | 0,856              |



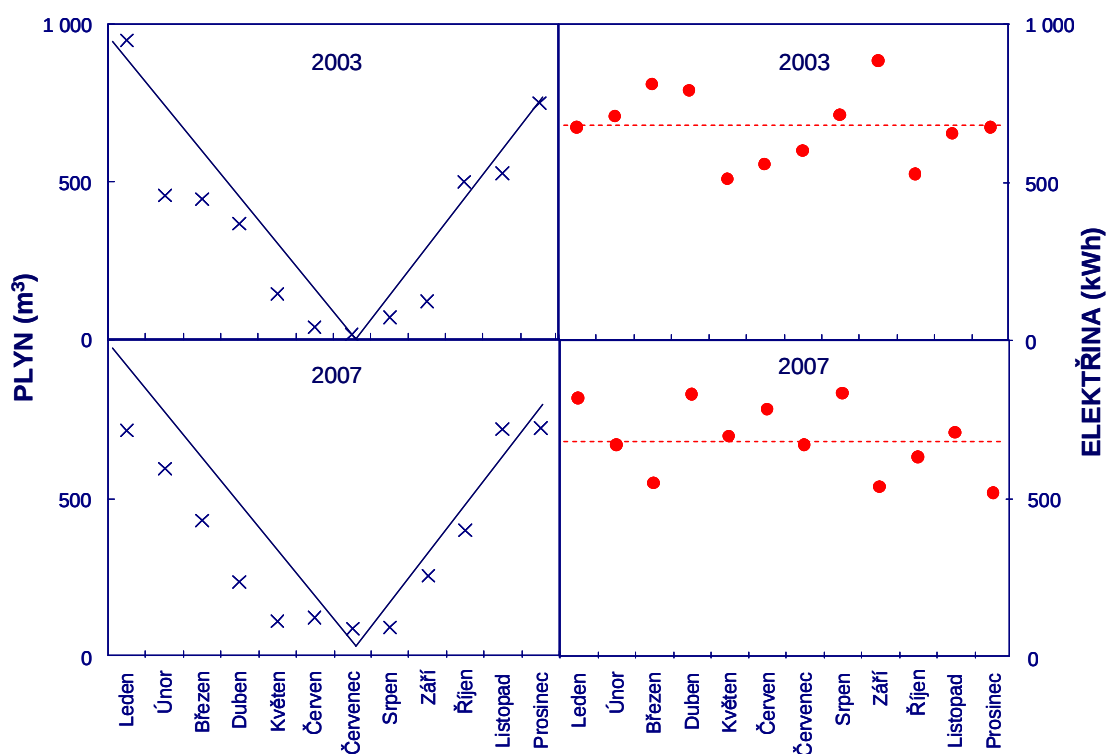
Obr.5.2. Komponentní diagram pro 4 vybrané komponenty a oba soubory dat

Z analýzy obou souborů vyplývají tato zjištění:

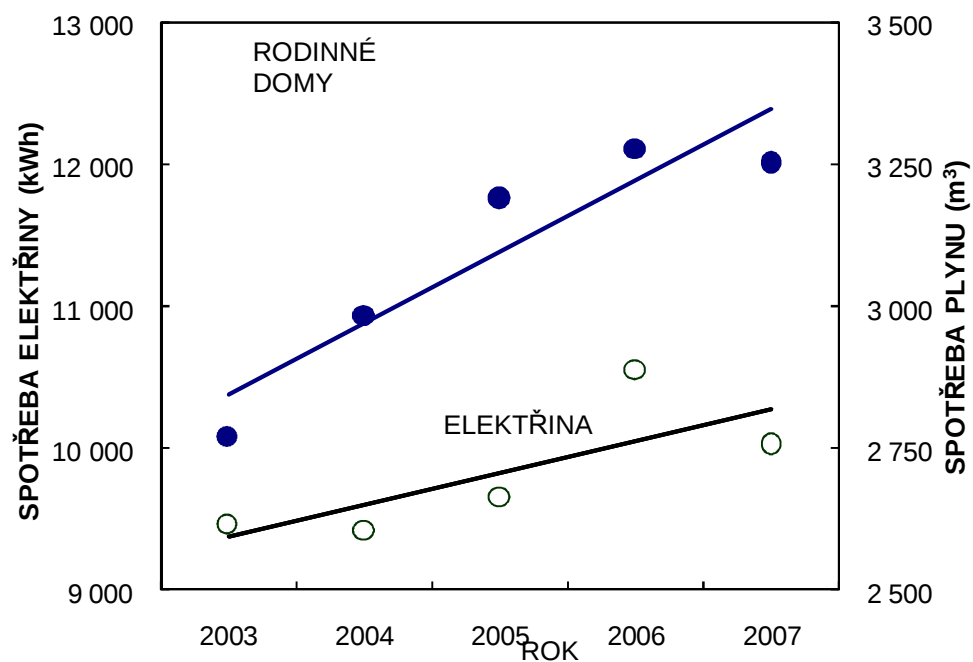
1. **Nebyla prokázána korelace** odběru elektřiny a tepla na souboru sledovaných bytů.
2. Spotřeba elektřiny a tepla v bytech **není závislá na užívané ploše bytu ani na počtu** bydlících.
3. Průměrná spotřeba elektřiny (jednotná sazba D02) v bytě je **4484 kWh ročně** a za tuto elektřinu zaplatili bydlící v roce 2008 průměrně částku **9720 Kč**. Průměrná spotřeba elektřiny (sazba D49 pro tzv. „denní“ a „noční“ odběr) v rodinném domě je **9171 kWh ročně** a za tuto elektřinu zaplatili obyvatelé v roce 2008 průměrně částku **17974 Kč**.
4. Průměrná spotřeba tepla v bytě je **13396 kWh ročně** a za tuto energii zaplatili bydlící v roce 2008 průměrně částku **16268 Kč**. Průměrná spotřeba tepla v rodinném domě je **34180 kWh ročně** a za tuto energii zaplatili obyvatelé v roce 2008 průměrně částku **41664 Kč**.

### Analýza časových řad

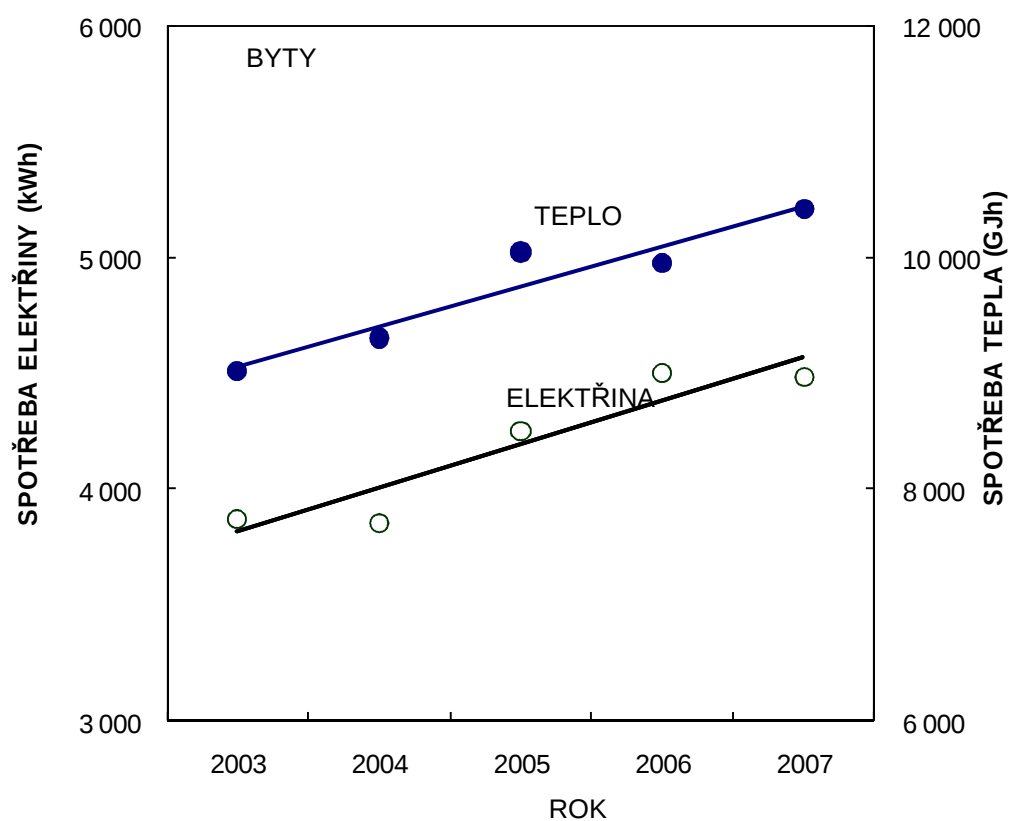
Pro oba soubory dat (rodinné domy a byty) jsme dále analyzovali časové závislosti spotřeby elektrické energie a tepla v jednotlivých měsících daného roku za posledních pět let (od roku 2003 do roku 2007) a určili jsme parametry příslušných teoretických funkcí, které popisují experimentální statistická data; na obr. 5.3 ilustrujeme spotřebu plynu a celkovou spotřebu elektřiny v jednotlivých měsících pro rok 2003 a pro rok 2007, na obr. 5.4 časovou závislost spotřeby elektřiny a plynu v letech 2003 až 2007.



Obr. 5.3 Spotřeba plynu a celková spotřeba elektřiny v jednotlivých měsících roku 2003 a 2007. Přímkou proložené data pro spotřebu plynu v jednotlivých měsících daného roku jsou pouze ilustrativní (nejedná se o trendovou funkci): ukazují nejdříve klesající a poté rostoucí spotřebu ve dvou různých polovinách roku. Přímkou proložené data pro spotřebu elektřiny představují průměr (674 kWh na jednu osobu domácnosti v roce 2003, resp. 688 kWh na jednu osobu domácnosti v roce 2007), kolem kterých oscilují data získaná v jednotlivých měsících daného roku.



Obr. 5.4. Spotřeba plynu a elektřiny u vybraných domácností v letech 2003 až 2007.  
Experimentální body jsou proloženy přímkou metodou nejmenších čtverců

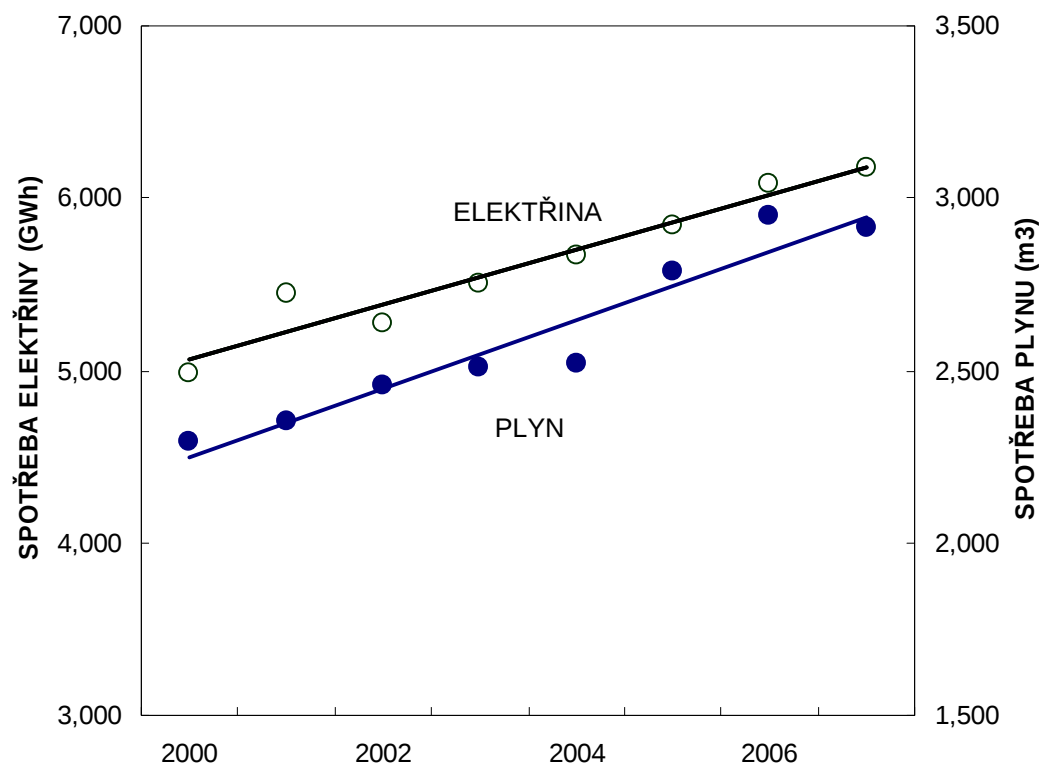


Obr. 5.5 Spotřeba tepla a elektřiny u vybraných bytů v letech 2003 až 2007.  
Experimentální body jsou proloženy přímkou metodou nejmenších čtverců

Námi získané výsledky časové analýzy jsme porovnali s daty publikovanými pro spotřebu elektřiny a plynu na území hlavního města Prahy v letech 2000 až 2007 (obr. 5.6). Tato publikovaná data byla proložena regresní přímkou. Lineárně časová závislost spotřeby elektřiny a plynu za posledních pět let z našeho experimentu je podobná trendu, který jsme zjistili u publikovaných dat. I když pouhých pět pozorování je na trendovou analýzu málo, lze i na tomto případě dovodit, že spotřeba jak plynu (tepla), tak elektřiny roste lineárně s časem. Extrapolace pro rok 2010 (kterou je vzhledem k malému počtu pozorování třeba brát s velkou rezervou) na základě tohoto lineárního modelu růstu predikuje hodnoty spotřeby plynu 3724,5 m<sup>3</sup> a spotřeby elektřiny 10956,9 kWh na jednu domácnost. Jedná se však pouze o hrubý odhad a tedy pouze o orientační hodnoty, protože dostupných dat je pro analýzu málo a tudíž je nutno zdůraznit, že jde pouze o ilustrativní výsledek, kterému nelze přikládat neúměrně velkou váhu.

Tab.5.13 Data proložená přímkou  $y=at + b$   
( $t$  je časová proměnná udávaná v letech,  $a, b$  jsou příslušné parametry)

|                              | Statistické údaje pro | Odhad modelu     | Hodnota $R^2$ |
|------------------------------|-----------------------|------------------|---------------|
| Publikovaná statistická data | Spotřeba plynu        | $99,36t + 2150$  | 92.25%        |
|                              | Spotřeba elektřiny    | $159,43t + 4904$ | 93.57%        |
| Naše statistická data        | Spotřeba plynu        | $125,58t + 2719$ | 85.73%        |
|                              | Spotřeba elektřiny    | $225,50t + 9152$ | 57.61%        |



Obr.5.6 Spotřeba elektřiny a plynu na území hlavního města Prahy letech 2000 až 2007.

Závěry, týkající se interpretace výsledků časové analýzy lze shrnout následovně:

1. Časový vývoj celkové spotřeby elektřiny v letech 2003 až 2007 lze popsat mírně rostoucí lineární funkcí (tab. 5.13 a obr. 5.4 resp. obr. 5.5).
2. **Spotřeba plynu (tepla)** vykazuje periodicitu za časové období jednoho roku a silnou korelaci s ostatními daty tohoto typu v příslušných jednotlivých měsících daného roku. Časovou závislost na jednotlivých měsících daného roku není lineární (obr.5.3). Časový vývoj spotřeby plynu v letech 2003 až 2007 lze popsat rostoucí lineární funkcí (tab.5.13 a obr. 5.4 resp. obr. 5.5).
3. **Časovou závislost spotřeby elektřiny a plynu lze popsat lineárním modelem růstu.** Lineární časové závislosti spotřeby elektřiny a zemního plynu za posledních pět let (v obou případech nárůst) z našeho experimentu jsou konzistentní s publikovanými daty týkající se spotřeby elektřiny a zemního plynu na území Prahy za stejné období.

## 5.2. Modelové řešení

V předchozím odstavci jsme analyzovali výsledky vlastního šetření týkající se energetické bilance domácností, které jsou významnými spotřebiteli energií (elektřiny a tepla) získávanými z klasických zdrojů (fosilní paliva, nukleární energetika). Zároveň jsou reálnými konzumenty energií z obnovitelných zdrojů a to zejména energie solární, vyráběné pomocí fotovoltaických panelů a energie tepelné, vyráběné prostřednictvím termosolárních kolektorů. Jak jsme ukázali v předchozí části této práce, oba tyto zdroje mohou představovat nezanedbatelný příspěvek do celkové energetické bilance a ten se pokusíme odhadnout na základě zjištěných údajů a modelů. Naše statistické šetření poskytlo výsledky na náhodném vzorku vybraných domácností a získané parametry na základě reálných ekonomických modelů, využívajících analýzu dostupných dat o využití PV-modulů a TS-kolektorů umožní nalézt optimální modelové řešení pro tyto spotřebitele energií. Časová závislost pak umožní provést příslušné extrapolace, na jejichž základě pak bude možno prognosticky zhodnotit vývoj na trhu s obnovitelnými energiemi (kap. 6).

Pomocí zobecněného modelu je možné provést výpočet cen energií vyrobených z různých obnovitelných energetických zdrojů: větrná energie, vodní zdroje, fotovoltaika, biomasa, geotermální a termosolární energie. Výsledky těchto analýz ilustrujeme v tab. 5.14, ve které pro srovnání uvádíme též investiční a provozní náklady a porovnání cen vyrobené energie s cenami výkupními. Je třeba poznamenat, že údaje o větrných generátorech pochází z německých zdrojů [42], kdy rozlišujeme soubory dat pro instalaci v krajině a instalaci v moři (SRN). V ČR je trh s větrnými generátory zatím zanedbatelný a svým způsobem i deformovaný; totéž platí o biomase, kdy monopolní výrobce s významnými finančními prostředky může vykoupit veškerou levnou biomasu. Pro ČR je zřejmě nejvýznamnější fotovoltaika a solární ohřev teplé užitkové vody, čemuž se věnujeme v další části práce.

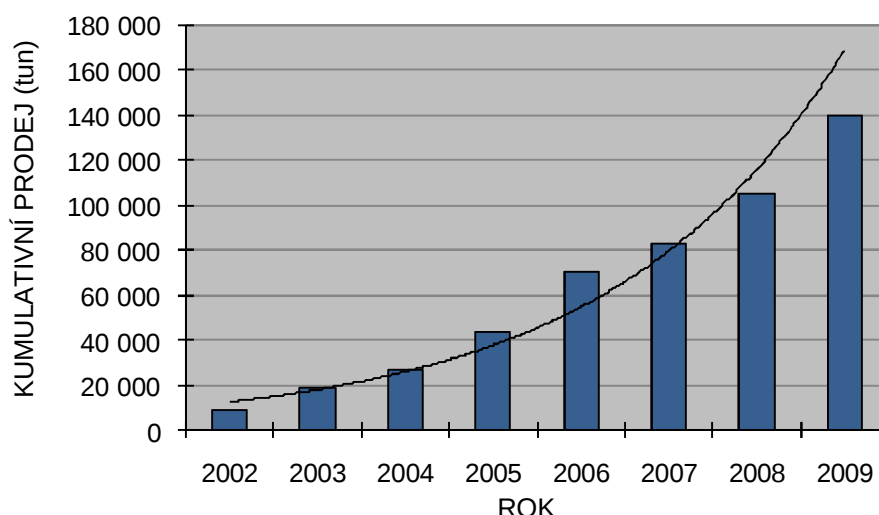
Tab. 5.14 Cena vyrobené energie z různých obnovitelných zdrojů

| Druh energie                             | Instalovaný výkon    | Roční provoz při plném výkonu | Roční výroba energie     | Investiční náklady       | Provozní náklady        | Cena vyrobené energie | Výkupní cena energie |
|------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>Větrná energie</b>                    |                      |                               |                          |                          |                         |                       |                      |
| On shore park <sup>1)</sup>              | 1 MW                 | 1 500 h                       | 1,5 mil kWh              | 1,04 mil Eur             | 30 450 Eur/rok          | 0,089 Eur/kWh         | 0,09 Eur/kWh         |
| On shore park <sup>1)</sup>              | 1 MW                 | 1 900 h                       | 1,9 mil kWh              | 1,09 mil Eur             | 43 500 Eur/rok          | 0,087 Eur/kWh         | 0,09 Eur/kWh         |
| Off shore park <sup>2)</sup>             | 5 MW                 | 3 750 h                       | 1,875 mil kWh            |                          |                         | 0,064 - 0,075 Eur/kWh | 0,09 Eur/kWh         |
| <b>Fotovoltaika</b>                      |                      |                               |                          |                          |                         |                       |                      |
| Malá inst.                               | 2-3 kWp              | 3 000 h                       | 800 kWh/kWp              | 6 900 Eur / kWp          | 0                       | 0,84 Eur/kWh          | 0,5 Eur/kWh          |
| Střední instalace                        | <50 kWp              | 3 000 h                       | 800 kWh/kWp              | 5 300 Eur / kWp          | 0                       | 0,64 Eur/kWh          | 0,5 Eur/kWh          |
| <b>Vodní energie</b>                     |                      |                               |                          |                          |                         |                       |                      |
| Malá inst.                               | 300 kW               | 5 000 h                       | 1,5 mil kWh              | 2,3 mil Eur              | 56 000 Eur/rok          | 0,15 Eur/kWh          | 0,05 Eur/kWh         |
| Střední instalace                        | 1 000 kW             | 5 000 h                       | 5,5 mil kWh              | 5,37 mil Eur             | 133 000 Eur/rok         | 0,1 Eur/kWh           | 0,05 Eur/kWh         |
| <b>Geotermální energie</b>               |                      |                               |                          |                          |                         |                       |                      |
| Tepelná enrgie                           | 2 MWt                | 2 000 h                       | 4 mil kWh                | 4,7 mil Eur              | 188 200 Eur/rok         | 0,15 Eur/kWh          | 0,08 Eur/kWh         |
| Tepelná enrgie                           | 20 MWt               | 2 000 h                       | 40 mil kWh               | 7,7 mil Eur              | 669 000 Eur/rok         | 0,03 Eur/kWh          |                      |
| Kombinovaná energie                      | 10 MWt               | 2 000 h                       | 30 mil kWh               | 11,2 mil Eur             | 358 000 Eur/rok         | 0,01 Eur/kWh          |                      |
|                                          | 1,5 Mwe              | 8 000 h                       | 12 mil kWh               |                          |                         | 0,0895 Eur/kWh        |                      |
| <b>Biomasa</b>                           |                      |                               |                          |                          |                         |                       |                      |
| Dřevní štěpka                            | 5 Mwe                | 7 000 h                       | 48,3 mil kWh             | 22 mil Eur               | 1,8 mil Eur             | 0,095 Eur/kWh         | 0,1 Eur/kWh          |
|                                          | 22,3 MWt             | 3 000 h                       | 67 mil kWh               |                          |                         |                       |                      |
| Bioplyn                                  | 150 kWe              | 7 000 h                       | 1,05 mil kWh             | 0,5 mil Eur              | 50 000 Eur              | 0,099 Eur/kWh         | 0,07 Eur/kWh         |
|                                          | 232 kWt              | 290 h                         | 0,067 mil kWh            |                          |                         |                       |                      |
| Skádkový plyn                            | 200 kWe              | 7 000 h                       | 1,4 mil kWh              | 0,5 mil Eur              | 56 000 Eur              | 0,067 Eur/kWh         | 0,06 Eur/kWh         |
|                                          | 330 kWt              | 2 000 h                       | 0,66 mil kWh             |                          |                         |                       |                      |
| <b>Termosolární energie<sup>3)</sup></b> |                      |                               |                          |                          |                         |                       |                      |
| Malá inst.                               | 5 m <sup>2</sup>     | 3 000 h                       | 500 kWh / m <sup>2</sup> | 920 Eur / m <sup>2</sup> | 14 Eur / m <sup>2</sup> | 0,19 Eur/kWh          |                      |
| Velká instalace                          | 200 m <sup>2</sup>   | 3 000 h                       | 500 kWh / m <sup>2</sup> | 409 Eur / m <sup>2</sup> | 6 Eur / m <sup>2</sup>  | 0,08 Eur/kWh          |                      |
| Velká instalace s akumulací              | 2 000 m <sup>2</sup> | 3 000 h                       | 500 kWh / m <sup>2</sup> | 716 Eur / m <sup>2</sup> | 11 Eur / m <sup>2</sup> | 0,24 Eur/kWh          |                      |

**Poznámky k tabulce:**

- 1) „on shore park“ – instalace v krajině
- 2) „off shore park“ – instalace v moři
- 3) termosolární energie se nevypukuje ve formě elektrické energie, používá se k výrobě tepla (ohřev teplé užitkové vody)

K analýze, jejíž výsledky prezentujeme v tab. 5.14, jsme využili modelové parametry (tab. 5.15) získané ze statistických údajů (kap. 4) pro PV-moduly, TS-kolektory, větrné generátory a biomasu; rovněž jsme stejným způsobem analyzovali data pro geotermální a vodní zdroje energií [42-44,59,60]. Pro biomasu jsme využili údaje publikované za roky 2002 až 2009 [45], týkající se prodeje pelet biomasy v SRN (obr. 5.7).



Obr.5.7 Prodej pelet biomasy v SRN za roky 2002 až 2008 (plus odhad na rok 2009)

Tab.5.15 Modelové parametry získané ze statistických údajů

| Zdroj energie     | Odhadnutý model        | Roční růst | Hodnota $R^2$ |
|-------------------|------------------------|------------|---------------|
| Fotovoltaika      | $m_f=1,128(1+0,398)^t$ | 39,8 %     | 0,9487        |
| Solární ohřev TUV | $m_f=0,093(1+0,165)^t$ | 16,5 %     | 0,9282        |
| Větrné generátory | $m_f=54,13(1+0,320)^t$ | 32,0 %     | 0,9892        |
| Biomasa           | $m_f=8315(1+0,376)^t$  | 37,6 %     | 0,9627        |

Je zřejmé, že nejdražším zdrojem obnovitelné energie je jednoznačně fotovoltaika. To souvisí jednoznačně s používanou technologií založenou na využití polykrystalického, monokrystalického a amorfního křemíku, jakožto jediného technicky i finančně dostupného substrátu pro tuto technologii (odst. 2.1). Je rovněž zřejmé, že tento zdroj obnovitelné energie se neobejde bez největší finanční dotace. Zvýhodnění při výkupu fotovoltaické elektřiny poskytují vyspělé země EU (a také ČR) v dlouhodobém časovém horizontu 15 až 20-ti let. V časovém horizontu nejbližších pěti let lze odhadnout nejnižší investiční náklady na instalaci fotovoltaického zařízení na úrovni **4,5 EUR / Watt** (instalace velkých projektů v rozsahu 0,1 - 25,0 MW – velká fotovoltaická zařízení) až do **6,0 EUR / Watt** (malé fotovoltaické systémy na střechách budov v rozsahu 1 až 10 kW). To ostatně vyplývá z ceny solárního článku, resp. PV modulu (kap. 4).

Významnou finanční dotaci též vyžaduje instalace větrných generátorů. I když je výkupní cena vyráběné energie tímto způsobem relativně nízká a pohybuje se v rozsahu 0,06 EUR/kWh (systém instalace „off shore park“) až 0,09 EUR/kWh (systém instalace „on shore park“), velmi vysoké jsou počáteční investiční náklady: na instalovaný výkon 1 MW je potřeba minimální investice kolem 1 milionu EUR.

Vysoké jsou též investiční a provozní náklady (na rozdíl od fotovoltaiky, kde jsou provozní náklady velmi nízké) na geotermální energii (odst. 2.2). Získávání tepla z tohoto ekologického zdroje není levné a může být efektivní pouze pro velké projekty (na úrovni minimálně 20 MW), tedy pro vytápění několika objektů v rámci dané lokality: např. vytápění měst, obcí, výrobních areálů a podobně. Totéž platí ovšem i o vytápění s využitím biomasy.

V zemích EU (SRN, Francie, Itálie, Španělsko, Benelux) se v posledních letech významným způsobem zvyšuje počet instalací rodinných fotovoltaických elektráren (solární střechy) v rozsahu instalovaných výkonů 1,375 až 4,125 kW a tento trend dle zobecněného modelu bude ještě pokračovat zhruba 5 let. Ekonomické výpočty pro tyto instalace ve standardních evropských klimatických podmínkách jsme prezentovali v tab. 4.3 (odst. 4.5.1), kde jsme též odhadli minimální návratnost této investice. Ukázali jsme, že návratnost investice se pohybuje v rozmezí osmi až deseti let (v závislosti na instalovaném výkonu). Rovněž ve vyspělých zemích EU roste počet velkých fotovoltaických instalací (instalovaný výkon větší než 1 MW) a v tomto smyslu ani ČR není výjimkou: za poslední dva roky byla v naší zemi instalovaná celá řada fotovoltaických zařízení o celkovém výkonu 55 MW, do konce tohoto roku to bude již více než 100 MW. Růstový trend bude pokračovat až do roku 2014, kdy „český fotovoltaický boom“ vyvrcholí.

## 6. Prognózy trhu obnovitelných energií

Ukázali jsme, že zobecněný ekonomický model nabídky a poptávky s variabilní elasticitou a časově závislou kapitálovou funkcí dokáže dobře popsat data o prodeji PV-modulů a TS-kolektorů získaná za relativně dlouhou dobu. To umožňuje určit základní ekonomické veličiny pro výpočet realizovaných projektů využívajících těchto zdrojů obnovitelných energií, a též extrapolovat vypočtené ekonomické veličiny charakterizující trh s těmito komoditami (ceny, množství) do časově určeného období, a rovněž odvodit kapitálovou přiměřenost připravované instalace těchto obnovitelných energetických zdrojů. Model založený na variabilitě elasticity poptávky a nabídky, kde se předpokládá, že kapitál je funkcí závislou na čase, umožňuje na základě statistických údajů určit ceny, množství prodeje a kumulované instalované výkony na trhu obnovitelných energií.

Největší trh pro obnovitelné energie představují země EU, USA a Japonsko. V tab. 6.1 prezentujeme jejich podíl (v MW instalovaného výkonu) na světovém trhu v roce 2008 s obnovitelnými energiemi pro fotovoltaiku (PV), termosolární ohřev (TS), biomasu, větrné generátory (VG) a malé vodní zdroje (MVZ). V tab. 6.2 pak totéž pro nejvyspělejší země EU, jimiž jsou ve využívání obnovitelných energetických zdrojů zejména Německo, Španělsko, Itálie, Francie a země Beneluxu; k těmto zemím již můžeme zařadit i Českou republiku vzhledem k „boomu“ solární energetiky, kterou odstartoval před pěti lety přijatý zákon o podpoře energií z obnovitelných zdrojů. V tab. 6.3 pak pro tyto země EU podrobně srovnáváme příspěvek od jednotlivých typů zařízení: pro fotovoltaické moduly využívající monokrystalický křemík (PV-mono), multikrystalický křemík (PV-multi), ostatní, zejména amorfní křemík (PV-ostatní); pro termosolární ohřev absorpční kolektory (TS-absorbční), vakuové kolektory (TS-vakuové), ostatní, zejména kolektory s absorpční vakuovou trubicí (TS-ostatní), biomasy (BIO-pelety a BIO-ostatní); to jen na ukázkou, že statistická data lze ještě případně dále segmentovat podle typu těchto zařízení na trhu obnovitelných energií.

Tab. 6.1 Rozdělení světového trhu obnovitelných energií (MW instalovaného výkonu)

| r. 2008           | EU      | USA     | Japonsko | Ostatní svět |
|-------------------|---------|---------|----------|--------------|
| PV                | 5 997,2 | 1 328,9 | 491,3    | 1 004,6      |
| TS                | 4 516,8 | 942,7   | 337,5    | 942,3        |
| Biomasa           | 3 582,6 | 703,8   | 279,4    | 444,5        |
| Větrné generátory | 2 642,5 | 1 104,2 | 211,7    | 837,1        |
| MVZ               | 1 298,0 | 835,4   | 92,2     | 1 128,7      |

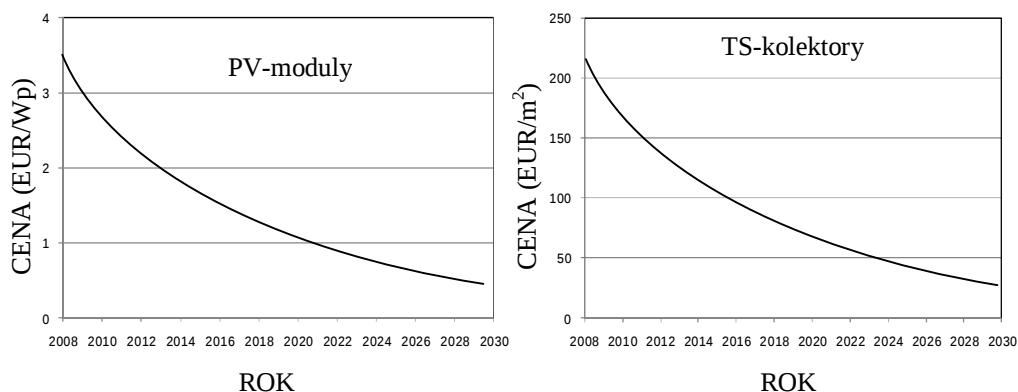
Tab. 6.2 Trh obnovitelných energií v zemích EU (MW instalovaného výkonu)

| r. 2008 | Německo | Španělsko | Itálie | Francie | Benelux | ČR   | Ostatní EU | EU Celkem |
|---------|---------|-----------|--------|---------|---------|------|------------|-----------|
| PV      | 3 988,4 | 644,9     | 521,5  | 256,8   | 264,8   | 54,3 | 266,5      | 5 997,2   |
| TS      | 2 516,0 | 844,9     | 355,6  | 333,4   | 263,1   | 95,4 | 108,4      | 4 516,8   |
| BIO     | 1 974,2 | 158,0     | 359,2  | 349,6   | 579,9   | 61,7 | 100,0      | 3 582,6   |
| VG      | 2 227,5 | 48,6      | 95,3   | 88,8    | 144,8   | 17,5 | 20,0       | 2 642,5   |
| MVZ     | 326,7   | 185,0     | 242,1  | 281,4   | 140,7   | 22,1 | 100,0      | 1 298,0   |

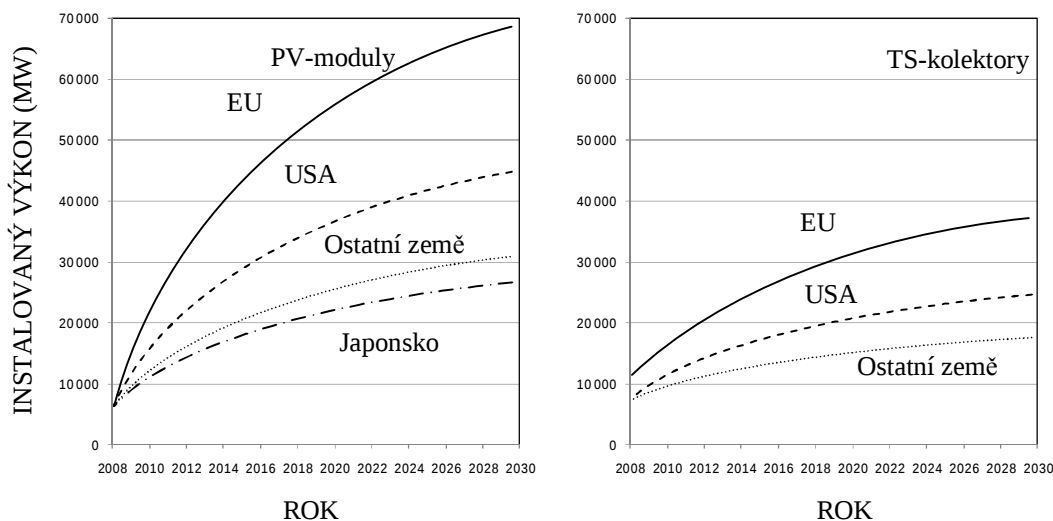
Tab. 6.3 Příspěvky od jednotlivých zařízení na produkci obnovitelné energie v zemích EU (MW instalovaného výkonu)

| r. 2008       | Německo         | Španělsko      | Itálie         | Francie        | Benelux        | ČR           |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| PV MONO       | 2 270,3         | 368,0          | 306,5          | 93,4           | 149,0          | 10,9         |
| PV MULTI      | 1 411,2         | 245,3          | 180,4          | 128,4          | 99,3           | 20,7         |
| PV OSTATNÍ    | 306,9           | 31,6           | 34,6           | 35,0           | 16,5           | 22,7         |
| TS ABSORPČNÍ  | 1 356,2         | 704,2          | 263,5          | 294,8          | 185,4          | 54,5         |
| TS VAKUOVÉ    | 1 120,5         | 120,5          | 82,7           | 18,6           | 61,8           | 21,4         |
| TS OSTATNÍ    | 39,3            | 12,2           | 9,4            | 20,0           | 15,9           | 19,5         |
| BIO PELETY    | 1 402,0         | 58,4           | 175,3          | 292,1          | 284,6          | 37,5         |
| BIO OSTATNÍ   | 572,2           | 99,6           | 183,9          | 57,5           | 295,3          | 34,2         |
| VG            | 2 227,5         | 48,6           | 95,3           | 88,8           | 144,8          | 17,5         |
| MVZ           | 326,7           | 185,0          | 242,1          | 281,4          | 140,7          | 22,1         |
| <b>Celkem</b> | <b>11 032,8</b> | <b>1 873,4</b> | <b>1 573,7</b> | <b>1 310,0</b> | <b>1 393,3</b> | <b>261,0</b> |

Cenovou prognózu na trhu obnovitelných energií do roku 2030 pro PV-moduly a TS-kolektory, odvozenou z námi provedené analýzy ilustrujeme na obr. 6.1. Jak je vidět z této extrapolace, ceny PV-modulů a TS-kolektorů klesají s časem tak, jak roste množství prodeje a tím i počet těchto instalovaných zařízení. Rostoucí PV-trh a TS-trh ilustrujeme pro EU, USA, Japonsko a ostatní země na obr. 6.2. Jak je vidno z tohoto obrázku, množstevní prodeje (instalace) fotovoltaických modulů porostou v nejbližších dvaceti letech podstatně rychleji, než termosolární kolektory.



Obr. 6.1. Vývoj cen PV-modulů a TS-kolektorů do roku 2030



Obr. 6.2. Vývoj instalací na PV-trhu a TS-trhu

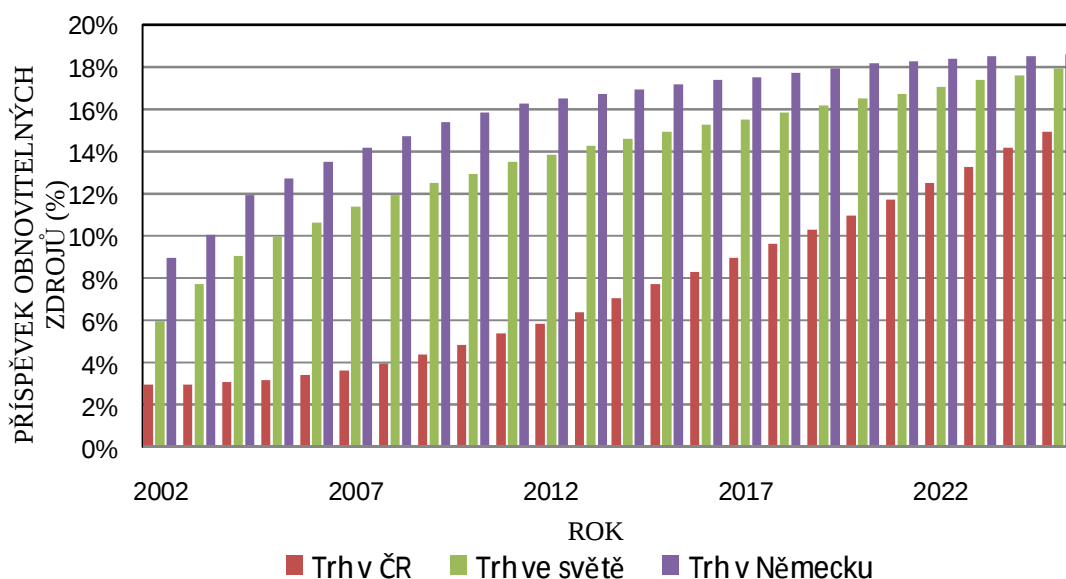
Ze zjištěných tvarů modelů lze též odvodit příspěvek obnovitelných energií do celkové energetické bilance. Přitom můžeme vyjít ze spotřeby energie (na jednoho obyvatele) v ČR a ve vybraných zemích v roce 2008 (viz tab. 6.4) a z našich statistických šetření ohledně spotřeby elektřiny a tepla v domácnostech ČR, jakož i údajů o spotřebě energií, zveřejňovaných ČSÚ [55]. Poměrné zastoupení obnovitelných energií v celkové energetické bilanci jsme určili analýzou publikovaných statistických údajů [42-44, 59, 60] v letech 2002, 2005 a 2008 a uvádíme je v tab. 6.5. Vypočtené příspěvky obnovitelných energetických zdrojů (v procentech) do příslušných bilancí na světovém trhu s energiemi do roku 2025 uvádíme na obr. 6.3, kde jsou tyto porovnány s energetickými trhy v SRN a ČR.

Tab. 6.4 Spotřeba energie na jednoho obyvatele v ČR a ve vybraných zemích EU v roce 2008

| Spotřeba energie                     | Jednotka          | Německo    | Francie    | Itálie     | Belgie     | Španělsko  | ČR           |
|--------------------------------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| Primární zdroje                      | GJ/osoba          | 165        | 172        | 185        | 240        | 205        | 150          |
| Elektřina                            | kWh/osoba         | 6 540      | 7 340      | 7 380      | 7 905      | 8 200      | 6 200        |
| Energetická náročnost                |                   |            |            |            |            |            |              |
| - brutto spotřeba                    | kWh/tis. Kč       | 24         | 30         | 27         | 30         | 33         | 44           |
| - netto spotřeba                     | kWh/tis. Kč       | 20         | 24         | 23         | 27         | 30         | 38           |
| <b>Celková energetická náročnost</b> | <b>MJ/tis. Kč</b> | <b>565</b> | <b>668</b> | <b>631</b> | <b>746</b> | <b>796</b> | <b>1 064</b> |

Tab. 6.5 Příspěvek obnovitelných zdrojů do celkové světové energetické bilance

| Zdroj                |                                    | ROK          |              |              |
|----------------------|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                      |                                    | 2002         | 2005         | 2008         |
| Neobnovitelné zdroje | Fosilní paliva (TWh)               | 2 567        | 2 780        | 2 964        |
|                      | Jaderná energetika (TWh)           | 624          | 782          | 896          |
|                      | Ostatní neobnovitelné zdroje (TWh) | 150          | 105          | 100          |
|                      | <b>Celkem (TWh)</b>                | <b>3 341</b> | <b>3 667</b> | <b>3 960</b> |
| Obnovitelné zdroje   | <b>Celkem (TWh)</b>                | <b>215</b>   | <b>397</b>   | <b>586</b>   |



Obr. 6.3 Prognóza příspěvků obnovitelných zdrojů do celkové energetické bilance

Roční spotřeba energie na jednoho obyvatele v ČR dosahuje současné době 150 GJ na osobu. Roční spotřeba elektrické energie na jednoho obyvatele ČR je nižší, než ve vyspělých zemích EU (viz tab. 6.4) a dosahuje asi 6200 kWh na osobu, přičemž v posledních letech roste jen velmi mírně. Energetická náročnost v ČR je však proti zemím EU téměř dvojnásobná (tab. 6.4), a to jak u tuzemské spotřeby

primárních zdrojů, tak i u elektrické energie. Vysoká energetická náročnost je zapříčiněná energeticky náročnou strukturou ekonomiky (průmyslovou výrobou), nikoli spotřebou energií v domácnostech. Na vysokou energetickou náročnost má nepochybně vliv i nedostatečné využívání obnovitelných zdrojů. Tempo snižování energetické náročnosti v ČR stagnuje nebo klesá jenom velmi mírně. Přitom spotřeba energie u domácností mírně roste. Pokud začnou domácnosti využívat obnovitelných zdrojů, a jde zejména o solární energetiku, lze zřetelně zvýšit příspěvek obnovitelných zdrojů do energetické bilance státu. Je známo, že české elektrárny, které využívají fosilních paliv, stárnou a odhaduje se, že v nejbližších pěti letech skončí životnost elektráren vyrábějících téměř šest set tisíc MW (to odpovídá asi třem jaderným elektrárnám typu Temelín). Jak vyplývá z naší analýzy v předchozí kapitole této práce, spotřeba elektřiny v roce 2015 by se mohla zvýšit asi o 12 % oproti stavu v roce 2008 a v roce 2020 by to mohlo být až o 20 %, za předpokladu stejného tempa vývoje. Právě zde jsou vidět možnosti, které pro domácnosti (rodinné domy a byty) poskytuje fotovoltaika a solární termika. V nejbližších pěti letech je reálná instalace až:

- 40000 solárních systémů (průměrný instalovaný výkon 2500 W) instalovaných na střechách rodinných domů, což by představovalo celkový instalovaný výkon 100 MW a výrobu elektrické energie zhruba 110 MWh za rok
- dalších 210 MW instalovaných u velkých fotovoltaických elektráren (již v příštím roce bude v ČR instalováno více než 100 MW z těchto zařízení)
- 25000 termosolárních systémů na ohřev teplé užitkové vody, což by představovalo instalovaný výkon až 15 MW.

Tab. 6.6 Prognóza vývoje využití obnovitelných zdrojů v ČR v roce 2015 a 2020

| Energetický zdroj  | Instalovaný výkon (MW) |            | Výroba energie (MW) |            | Úspora emisí CO <sub>2</sub> (tis. tun) |              |
|--------------------|------------------------|------------|---------------------|------------|-----------------------------------------|--------------|
|                    | 2015                   | 2020       | 2015                | 2020       | 2015                                    | 2020         |
| Fotovoltaika       | 320                    | 440        | 350                 | 484        | 1 465                                   | 2 030        |
| Termosolární ohřev | 15                     | 18         | 12                  | 15         | 69                                      | 87           |
| Biomasa            | 200                    | 260        | 160                 | 208        | 923                                     | 1 200        |
| Větrná energetika  | 100                    | 130        | 80                  | 104        | 462                                     | 600          |
| <b>Celkem</b>      | <b>635</b>             | <b>848</b> | <b>602</b>          | <b>811</b> | <b>2 919</b>                            | <b>3 917</b> |

Prognózu vývoje využití obnovitelných zdrojů v ČR na roky 2015 a 2020 uvádíme v tab. 6.6, ve které odhadujeme na základě analýzy statistických údajů (viz tab. 5.15) v rámci odhadu modelu i perspektivy biomasy a větrné energetiky. Příznivá prognóza růstu podílu obnovitelných energií na celkové energetické bilanci

ukazuje, že v roce 2015 lze z obnovitelných zdrojů získat až 635 MWh energie (téměř 8 % celkové energetické spotřeby v ČR) a v roce 2020 je to téměř 850 MWh energie (téměř 11 % celkové energetické spotřeby v ČR); přitom dominuje fotovoltaika. Produkce emise CO<sub>2</sub> se sníží o 2.9 mil. tun (v roce 2015), respektive 3.9 mil. tun (v roce 2020). Při výpočtu koncentrací emisí CO<sub>2</sub> do ovzduší jsme vzali v úvahu tzv. „emisní faktor“, který je 577g / kWh vyrobené energie z klasických fosilních zdrojů a 922g / kWh vyrobené energie z jaderných elektráren. Je tedy zřejmé, že podíl obnovitelných energií na celkové energetické bilanci ČR v letech 2015-2020 může být v rozsahu 8 % až 11 %.

## 7. Závěry

S využitím ekonomických modelů nabídky a poptávky jsme analyzovali data o prodeji fotovoltaických modulů a termosolárních kolektorů na celosvětovém trhu obnovitelných energetických zdrojů. Zatímco růstový model popisuje nárůst prodeje a instalací, charakteristický pro počáteční období využívání těchto obnovitelných energetických zdrojů, přibližuje model variabilní elasticity reálnější situaci na trhu s obnovitelnými energetickými zdroji, kde může docházet ke zpomalení nebo ke zrychlení kumulativních prodeje a tím i změně cenových relací. Prokázali jsme, že jednoduchý růstový model „neomezené poptávky“, založený pouze na růstu prodeje a cen není realistický a dlouhodobě nemůže být ekonomicky funkční. Jedním z důvodů je především cena, která se na trhu mění, a tudíž se mění i příslušné množství prodeje. Elasticita trhu je reálný ekonomický parametr, který reprezentuje procentuální nárůst relativního trhu, kdy se relativní cena snižuje o dané procento. Určuje tudíž relaci mezi odbytem na trhu a tržní cenou produktu. Chování trhu pro parametr elasticity  $E$  a koeficient redukce ceny  $n$  určuje součin těchto veličin: pro hodnoty  $En > 1$  jde o růst trhu, pro hodnoty  $En < 1$  je to pokles trhu. V modelu variabilní elasticity, kdy konstantní parametr  $E$  nahrazujeme funkcí závislou na objemu trhu, ceně a času, můžeme určit příslušné parametry pro různé stavy na trhu: růst, nasycení, pokles. V zobecněném tržním modelu zavádíme kromě funkce elasticity též kapitálovou funkci, která představuje změnu kapitálu (součin množství a ceny) v závislosti na čase: tato představuje kapitálovou přiměřenost a mění se s časem v závislosti na inflaci.

Modelová reprezentace trhu s obnovitelnými energiemi, založenými na celosvětovém prodeji fotovoltaických (PV) modulů a termosolárních (TS) kolektorů od roku 1990, zaznamenává růst 39,8 % (PV) a 16,5 % (TS) ročně; analýza údajů založená na modelu růstu umožnila odhadnout kumulativní prodeje na základě tohoto modelu, přičemž s nárůstem množství vyrobených modulů a kolektorů klesá jejich tržní hodnota. Realističtější modelová představa PV+TS trhu vychází z ekonomických modelů nabídky a poptávky s konstantní elasticitou. V tomto modelu parametr elasticity  $E$  představuje konstantní procentuální růst trhu v závislosti na parametru redukce ceny  $n$ ; nejlepší shoda modelového přiblížení a statistických údajů byla dosažena pro hodnoty  $nE=1,39$  (PV-trh) a  $nE=1,22$  (TS). Trh je progresivní, dochází k růstu prodejů a snižování tržní ceny modulů až na hodnoty, se kterými lze v současné době počítat při projektových kalkulacích: 3,5 EUR/W (pro PV moduly) a 215 EUR/m<sup>2</sup> pro TS kolektory). Pro hodnoty  $nE > 1$  dochází k růstu trhu (množstevní prodeje), který lze korigovat započtením roční inflace pomocí kapitálové funkce  $C_s(t)$  v závislosti na časové proměnné. Prokázali jsme, že pro tento trh obnovitelných energií je postačující uvažovat lineárně rostoucí kapitálovou časovou funkci s růstem 2,5 až 3 % ročně, což odpovídá i průměrnému růstu celkové energetické bilance. Zobecněný model lze použít pro věrohodnou předpověď vývoje trhu s obnovitelnými energiemi PV+ST na nejbližších 10 let. Pro rok 2020 jsme určili celkové kumulativní prodeje a příslušné cenové relace: zatímco prodeje PV modulů vzrostou přibližně 8 krát (ve srovnání s rokem 2008), prodeje ST kolektorů vzrostou nanejvýš 4 krát (ve srovnání s rokem 2008). Přitom se ceny PV modulů sníží z 3,50 EUR/W na 1,375 EUR/W a ceny TS kolektorů z 215 EUR/m<sup>2</sup> se do roku 2020 sníží na 95 EUR/m<sup>2</sup>.

Sestrojený model lze použít pro výpočty kapitálové přiměřenosti fotovoltaických a termosolárních projektů, které mají být realizovány. Pro nejtypičtější případy použití (fotovoltaické zařízení instalované na střechách budov v rozsahu instalovaného výkonu 1 až 6 kW, fotovoltaická elektrárna o instalovaném výkonu kolem 1 MW a zařízení pro termosolární ohřev v rozsahu instalovaných výkonů 0,3 až 1,8 kW) jsme určili odpovídající ekonomické parametry: minimální investici, roční tržby za vyrobenou elektřinu (případně energetickou úsporu za vyrobené teplo) a investiční návratnost. Pro realizaci malých fotovoltaických projektů na střechách rodinných domů je optimální instalovaný výkon kolem 4 kW, který při počáteční investici zhruba 4,5 EUR/W umožňuje návratnost počáteční

investice za 8 až 19 let, a to při funkci zařízení minimálně 25 let, ale ve skutečnosti to může být až 50 let. Pro realizaci solárního ohřevu je optimální instalovaný výkon 0,6 kW, úspora tepla až 23 % a návratnost investice za 7 až 8 let (opět při době využívání zařízení minimálně 25 let). Kapitálová investice do fotovoltaického projektu o instalovaném výkonu 1 MW představuje částku zhruba 100 až 110 mil. Kč a s její návratností lze počítat v horizontu do deseti let.

Možnou energetickou úsporu jsme se snažili odhadnout u domácností (rodinné domy a byty), které mohou být relevantními spotřebiteli obnovitelných energií ze slunečního záření. Proto jsme provedli statistická šetření na dvou náhodně vybraných souborech (rodinné domy a byty), jejichž účelem bylo zjistit údaje o spotřebě těchto domácností. Přitom jsme vycházeli z reálné situace, týkající se skutečné spotřeby a platných sazebníků za elektřinu a teplo. Zjistili jsme průměrné spotřeby plynu a elektřiny u rodinných domů, resp. tepla a elektřiny u bytů. Námi provedená analýza prokázala, že instalace fotovoltaického zařízení na střeše rodinného domu o výkonu větším než 2,5 kW je plně postačující k pokrytí spotřeby elektřiny rodinného domu. V nejbližších pěti letech je reálné, že v ČR dojde k instalaci až čtyřiceti tisíc fotovoltaických systémů tohoto typu (to je celkový výkon 100 MW), což představuje v našich klimatických podmínkách výrobu solární energie až 110 MWh za rok. Již příští rok bude instalováno dalších 100 MW u fotovoltaických elektráren o instalovaném výkonu 1 až 10 MW, v roce 2015 to bude celkem 320 MW a v roce 2020 celkem 440 MW. U systémů na ohřev teplé užitkové vody lze na základě sestavených modelů odhadnout instalaci až pětadvacet tisíc termosolárních systémů v nejbližších pěti letech na střechách rodinných domů, což však představuje výrobu nejvýše 15 MW za rok. Analýzou dat jsme zjistili, že spotřeba elektřiny a tepla v domácnostech nejsou korelované veličiny, spotřeba tepla v domácnostech nezávisí na spotřebě elektřiny a v bytech je výhodnější centrální odběr tepla. Tepelný ohřev z termosolárních kolektorů může sice přinést relativně významnou úsporu až 23 % ročně pro rodinný dům, efektivnost této úspory však snižuje sezónnost ohřevu (letní a zimní měsíce) a rovněž skutečnost, že teplo nelze skladovat ani prodat do sítě (na rozdíl od elektřiny).

Je evidentní, že podíl obnovitelných energií na celkové bilanci se bude zvyšovat jak na světovém trhu s energiemi (již v roce 2015 to bude 15 % na světovém trhu a v SRN dokonce 16 %), tak i v České republice: reálný je příspěvek v rozmezí 8 % (rok 2015) až 11 % (rok 2020). Při tomto příspěvku obnovitelných

zdrojů do celkové energetické bilance ČR se sníží produkce škodlivých emisí do ovzduší téměř o tři (v roce 2015) resp. čtyři (v roce 2020) miliony tun. Dosažení tohoto stavu je plně možné, závisí na snižování energetické náročnosti a na růstu, který predikuje námi aplikovaný zobecněný ekonomický model nabídky a poptávky na trhu s obnovitelnými energiemi. V naší zemi je významný prostor zejména pro využití fotovoltaiky, což je v souladu jak s koncepcí státní hospodářské politiky, tak i v souladu s mezinárodními závazky.

Autor si dovoluje poděkovat svému školiteli Doc. RNDr. Luboši Markovi, CSc., za nevšední zájem o tuto práci, velmi cenné rady a podnětné připomínky. Autor děkuje rovněž Prof. Ing. Petru Hebákovi, CSc., za cenné konzultace a rady v oblasti vícerozměrné statistické analýzy a teorie statistické interakce a Mgr. Michalu Vrabcovi, CSc. za rady a připomínky v oblasti metod výběrových šetření.

## Literatura

- 1) Agresti A.: Categorical Data Analysis, Wiley, 1990, New York, MR 1044993
- 2) Ardilly P.: Les techniques de sondage. 2eme Edition, Edition Technip, 2005, Paris
- 3) Arltová M., Matušů J., Kozák J.: STATGRAPHICS Plus for Windows, Oeconomia Praha, 2004. Praha; ISBN: 80-245-0731-5.
- 4) Ascherio A., Weisskopf M.G., O'Reilly E.J., McCullough M.L., Calle E.E., Rodriguez C., Thun M.J.: Americal Journal of Epidemiology, vol 160 (2004) 977
- 5) Azzalini A., Cox D.R.: Journal of Royal Statistics Society, Ser. B, vol.46 (1984) 335
- 6) Beral V., Bull D., Reeves G.: A Million Women Study Collaborators, Lancet, vol. 365 (2005) 1543
- 7) Berington de Gonzáles A., Cox R.D.: Interpretation of Interaction: Review. The Annals of Applied Sciences, vol. 1, 2007, p.371.
- 8) Berkson J.: Journal of Americal Statistics Association, vol. 53, (1958) 28
- 9) Blot W. J. , Day N. E.: Americal Journal of Epidemiology, vol.110 (2000) 99
- 10) Box G.E.P. ,Draper N.R.: Mixtures and Ridge Analyses, 2nd Edition Wiley and Sons, 2007, New York
- 11) Breslow N.A. , Day N.E.: Statistical Mathods in Cancer Research. Analysis of Case-Control Studies. IARC Scientific Publications, 1998, Lyon
- 12) Cardon L.R. and Palmer L.J.: Lancet vol. 361 (2003) 598
- 13) Cox D.R.: International Statistics Review, vol.52 (1984)1
- 14) Cronbach L.J. and Snow R.E.: A Handbook for Research on Interactions. Irvington Publishers Inc., 1981, New York
- 15) Čermák V.: Výběrové statistické zjišťování, Praha, SNTL, 1981.
- 16) Ernst L.: Weithing issues for longitudinal household and family estimates. In panel Surveys. John Viley and Sons, New York, (1989) 682
- 17) Goodman L. A.: Annual Statistics, Vol. 13 (1985) 10
- 18) Gustavson P., Nyberg F., Pershagen G., Scheele P., Jakobsson R. and Plato N.: 2000, Americal Journal of Epidemiology, vol.155 (2000) 1016
- 19) Hastie T.J., Tibshirani R.J.: Generalized Aditive Models. Chapman and Hall Editors, London, 1990

- 20) Hebák P., Hustopecký J., Pecáková I., Průša M., Řezanková H., Svobodová A., Vlach P.: Vícerozměrné statistické metody. Informatorium Praha, 2004. ISBN: 80-7333-025-3.
- 21) Horvitz D.G., Thompson D.J.: A Generalization of Sampling Without Replacement from a Finite Universe. Journal of American Statistical Association, vol. 47, (1952) pp.663-685
- 22) Cheeseman P., Stutz J.: Bayesian Classification: Theory and Results. Advances in Knowledge Discovery and Data Mining, AAAI Press, 1995, New York
- 23) Kozma P.: Perspektiva solární energetiky v ČR. Stavební listy 2 (2006), 23; ISSN 1211 4790
- 24) Kozma P.: Zkušenosti z praktického využívání obnovitelných zdrojů v zemích EU. Stavební listy 2 (2006) 24; ISSN 1211 4790
- 25) Kozma P.: Zkušenosti z praktického využívání OZE v zemích EU. Alternativní energie 1/2009, roč. XII, (2009) 14; ISSN 1212-1673; [www.alen.cz](http://www.alen.cz)
- 26) Kozma P.: Ekonomická analýza trhu s obnovitelnými energiemi. ENEF 8: Sborník 8. mezin.konference ENEF (Energy Efficiency), 22.-24.10.2008, Sliač, Slovensko
- 27) Kozma P.: Greeninvest Energy - projekt Ladná I., 2009-10-04
- 28) Kozma P.: Interakce v teorii statistiky. Mundus Symbolicus 16 (2008) 89; ISSN 1210-809X
- 29) Kozma P.: Obnovitelné zdroje (I v budoucnu se vyplatí investovat do solární energie). Časopis EURO 43 (2007) 122; ISSN 1212-3129
- 30) Kozma P.: Photovoltaic and Thermosolar Market Forecast Based on the Demand Elasticity Model. Proc. of the 10th International Scientific Conference AMSE (Applications of Mathematics and Statistics in Economy), held 29.8.-1.9.2007 at Poprad, Slovakia, pp.125-129; ISBN 978-80-969535-7-8
- 31) Kozma P.: Renewable Energy Market Forecast Based on a Demand Elasticity Model. Mundus Symbolicus 14 (2006) 92; ISSN 1210-809X
- 32) Kozma P.: Renewable Energy Market Forecast Based on the Variable Elastic Model. Mundus Symbolicus 15 (2007) 115; ISSN 1210-809X

- 33) Kozma P.: Solární ohřev teplé užitkové vody. Stavební listy 3 (2006), 29; ISSN 1211 4790
- 34) Kozma P.: Statistické modely trhu obnovitelných energií. Sborník prací účastníků vědeckého semináře doktorského studia, VŠE Praha 2009, 184; ISBN 978-80-245-1524-3
- 35) Kozma P.: Statistické šetření energetické bilance. Mundus Symbolicus 16 (2008) 75; ISSN 1210-809X
- 36) Kozma P.: Technické perspektivy fotovoltaiky. Alternativní energie 3/2009, roč.XII, (2009) 26; ISSN-1673; [www.alen.cz](http://www.alen.cz)
- 37) Lavallée P.: Cross-sectional Weighting of Longitudinal Surveys of Individuals and Households Using the Weight Share Method. Survey Methodology, vol. 21, No.1, (1995) 25
- 38) Lavallée P.: Indirect Sampling, 2007, Springer Series in Statistics. ISBN 10-0387-70788-6.
- 39) Madansky A.: Prescriptions for Working Statistics, Springer Verlag, 1988, New York
- 40) Program SPSS Professional Statistics 6.1, SPSS Inc. 1994
- 41) R-Development Core Team: R Foundation for Statistical Computing, 2006, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0; [www.R-project.org](http://www.R-project.org).
- 42) Renewable Energy World, vol.11 (2008) 24; ISSN 1462-6381
- 43) Renewable Energy World, vol.12 (2009), 1; ISSN 1462-6381
- 44) Renewable Energy World, vol.9 (2006), 52; ISSN 1462-6381
- 45) Report BaFa: Distribution of installed palletes rating systems in Germany. BaFa-2009, Springer Verlag, Berlin
- 46) Report IEC-60904-3: Procedures for temperature and irradiance correction to measured V-A parameters of crystalline photovoltaic devices. Fraunhofer Institut, 1993
- 47) Rothman K.J., Greenland S. and Walker A.M.: American Journal of Epidemiology, vol.112 (1980) 467
- 48) Rousseuw P., Struyf A., Hubert M.: Clustering in an Object Oriented Environment. Journal of Statistical Software, vol. 1 (1996) 4
- 49) Samuelson P.A., Nordhaus W.D.: Economics, 17th Edition, McGraw-Hill (2001) p.157-169. ISBN 0072314885

- 50) Sarndal S.E., Svensson B., Wretman J.: Model Assisted Survey Sampling. Springer Verlag. 1992, New York
- 51) Siemiatycki J., Thomas D.C.: International Epidemiology , vol. 10 (1981) pp.383-387
- 52) Singh A. C.: Metodology of the Canadian Labour Force Survey, Statistics Canada. Catalogue (1990) 71
- 53) Thompson S.K., Seber G.A.: Adaptive Sampling. John Wiley and Sons, 1996, New York
- 54) Vilík O.: Konstrukce intervalů spolehlivosti pomocí bootstrapových výběrů. Seminární práce k předmětu STP-911: Pokroky v teorii statistiky, VŠE Praha, 2008
- 55) [www.czso.cz](http://www.czso.cz)
- 56) [www.ministerstvozdravotnictví.cz](http://www.ministerstvozdravotnictví.cz)
- 57) [www.mzp.cz](http://www.mzp.cz)
- 58) [www.portal.env.cz](http://www.portal.env.cz)
- 59) [www.renewable-energy-world.com](http://www.renewable-energy-world.com)
- 60) [www.solarbuzz.com](http://www.solarbuzz.com)
- 61) Znaor A. A., Brennan P., Gajalakshmi V., Mathew A., Shanta V., Varghese C., Boffeta P. : International Journal of Cancer, vol. 105 (2003) 681
- 62) Zvára K.: Regresní analýza. Academia Praha, 1989, Praha

## Příloha A: Technické pojmy

### Energie:

Základní jednotkou energie je elektronVolt (eV), hlavní odvozenou jednotkou, užívanou v technické a ekonomické terminologii je Watt (W). **Elektrickou energii** měříme ve **Watttech** (W), užíváme též značení  $W_e$ , které znamená, že jde o elektrický výkon (index „e“), na rozdíl od značení  $W_t$  pro tepelný výkon (index „t“). Pro maximální hodnotu výkonu užíváme označení  $W_p$  (tzv. „Watt peak“ – index „p“). Násobky této jednotky: kW (kiloWatt), MW (megawatt), GW (gigawatt), TW (terrawatt):  $1\text{ kW} = 10^3\text{ W}$ ,  $1\text{ MW} = 10^6\text{ W}$ ,  $1\text{ GW} = 10^9\text{ W}$  a  $1\text{ TW} = 10^{12}\text{ W}$ .

### Výkon:

Výkon je energie získaná za daný čas, základní jednotkou (elektrického výkonu) je Watthodina (Wh), nejužívanější jednotkou je kilowatthodina (kWh):  $1\text{ kWh} = 10^3\text{ Wh}$ . Pojem elektrický výkon lze pro naše účely nahradit pojmem **spotřeba elektrické energie**.

Násobky této jednotky:  $1\text{ MWh} = 10^6\text{ Wh}$ ,  $1\text{ GWh} = 10^9\text{ Wh}$ ,  $1\text{ TWh} = 10^{12}\text{ Wh}$ .

### Teplo:

Teplo je formou energie, základní jednotkou je Joule (J). Mezi jednotkami **tepelného a elektrického výkonu** platí následující vztah:  $1\text{ kW} = 3,59 \times 10^3\text{ J}$ .

Násobky této jednotky:  $1\text{ kJ} = 10^3\text{ J}$ ,  $1\text{ MJ} = 10^6\text{ J}$ ,  $1\text{ GJ} = 10^9\text{ J}$ ,  $1\text{ TJ} = 10^{12}\text{ J}$ .

Pro převod **spotřeby plynu** udávaného v ( $\text{m}^3$ ) na elektrickou energii lze užít přepočtu:  $1\text{ m}^3 = 10,544\text{ kWh}$  a následně vztahu pro přepočet na tepelnou energii (a též jejich násobků).

### Koncentrace emisí:

Základní jednotkou pro koncentraci emisí je **ppm** (part per milion):  $1\text{ ppm} = 10^{-6} = 0,0001\% = 1\text{ g/t}$ . Pro naše účely lze vyjádřit koncentraci emisí do ovzduší v gramech (případně v kilogramech a tunách). Při výpočtu koncentrací emisí do ovzduší lze uvažovat tzv. „emisní faktor“ vztažený k 1 kWh vyrobené elektrické energie z klasických fosilních zdrojů ( $577\text{ g u CO}_2$ ), případně vztažený k 1kWh vyrobené elektrické energie z klasických zdrojů a jaderných elektráren ( $922\text{ g u CO}_2$ ).

## Příloha B: Soubor dat získaných statistickým šetřením

### Spotřeba energií u vybraného souboru rodinných domů

| Místo             | Pořadí | Spotřeba plynu (m <sup>3</sup> ) | Spotřeba noční elektřiny (kWh) | Spotřeba denní elektřiny (kWh) | Celková spotřeba elektřiny (kWh) | Venkovní bazén | Objem (m <sup>3</sup> ) | Počet obyvatel |
|-------------------|--------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| Praha východ      | 1      | 4 570                            | 8 540                          | 1 842                          | 10 382                           | Ano            | 780                     | 3              |
| Praha východ      | 2      | 4 203                            | 11 337                         | 2 078                          | 13 415                           | Ano            | 811                     | 4              |
| Praha východ      | 3      | 4 168                            | 9 186                          | 1 914                          | 11 100                           | Ano            | 720                     | 7              |
| Praha východ      | 4      | 3 013                            | 6 634                          | 1 331                          | 7 965                            | Ano            | 510                     | 2              |
| Praha východ      | 5      | 2 546                            | 6 074                          | 1 106                          | 7 180                            | Ne             | 490                     | 5              |
| Praha východ      | 6      | 2 111                            | 4 281                          | 998                            | 5 279                            | Ne             | 385                     | 3              |
| Praha východ      | 7      | 1 315                            | 2 188                          | 817                            | 3 005                            | Ano            | 282                     | 4              |
| Praha východ      | 8      | 1 987                            | 3 902                          | 915                            | 4 817                            | Ano            | 388                     | 4              |
| Praha východ      | 9      | 2 005                            | 3 737                          | 1 023                          | 4 760                            | Ne             | 476                     | 5              |
| Praha východ      | 10     | 2 660                            | 3 987                          | 1 914                          | 5 901                            | Ano            | 499                     | 6              |
| Benešov           | 11     | 2 014                            | 3 080                          | 1 077                          | 4 157                            | Ne             | 511                     | 6              |
| Benešov           | 12     | 1 815                            | 2 739                          | 1 413                          | 4 152                            | Ne             | 586                     | 6              |
| Benešov           | 13     | 1 773                            | 5 817                          | 1 036                          | 6 853                            | Ne             | 620                     | 6              |
| Benešov           | 14     | 3 563                            | 4 496                          | 1 115                          | 5 611                            | Ne             | 680                     | 5              |
| Benešov           | 15     | 2 108                            | 4 155                          | 952                            | 5 107                            | Ano            | 398                     | 6              |
| Benešov           | 16     | 2 010                            | 5 138                          | 996                            | 6 134                            | Ne             | 415                     | 6              |
| Benešov           | 17     | 2 027                            | 5 012                          | 1 336                          | 6 348                            | Ne             | 440                     | 7              |
| Benešov           | 18     | 2 752                            | 6 123                          | 1 089                          | 7 212                            | Ne             | 480                     | 4              |
| Benešov           | 19     | 2 917                            | 4 212                          | 1 710                          | 5 922                            | Ano            | 422                     | 4              |
| Benešov           | 20     | 3 056                            | 5 710                          | 1 543                          | 7 253                            | Ano            | 693                     | 7              |
| Praha 5 (Zličín)  | 21     | 4 010                            | 10 272                         | 2 941                          | 13 213                           | Ne             | 884                     | 2              |
| Praha 5 (Zličín)  | 22     | 3 736                            | 7 111                          | 1 912                          | 9 023                            | Ne             | 601                     | 2              |
| Praha 5 (Zličín)  | 23     | 4 188                            | 9 367                          | 2 085                          | 11 452                           | Ne             | 692                     | 3              |
| Praha 5 (Zličín)  | 24     | 4 912                            | 11 528                         | 3 016                          | 14 544                           | Ano            | 791                     | 4              |
| Praha 5 (Zličín)  | 25     | 4 757                            | 10 306                         | 2 544                          | 12 850                           | Ano            | 700                     | 4              |
| Praha 5 (Zličín)  | 26     | 3 991                            | 8 774                          | 2 025                          | 10 799                           | Ne             | 750                     | 4              |
| Praha 5 (Zličín)  | 27     | 6 012                            | 12 538                         | 3 311                          | 15 849                           | Ne             | 1 080                   | 5              |
| Praha 5 (Zličín)  | 28     | 4 496                            | 11 103                         | 3 156                          | 14 259                           | Ne             | 737                     | 5              |
| Praha 5 (Zličín)  | 29     | 4 300                            | 15 226                         | 1 027                          | 16 253                           | Ano            | 640                     | 4              |
| Praha 5 (Zličín)  | 30     | 5 884                            | 8 944                          | 3 190                          | 12 134                           | Ne             | 996                     | 6              |
| Praha 5 (Smíchov) | 31     | 2 075                            | 6 210                          | 1 715                          | 7 925                            | Ne             | 610                     | 3              |
| Praha 5 (Smíchov) | 32     | 2 511                            | 7 886                          | 2 336                          | 10 222                           | Ne             | 650                     | 4              |
| Praha 5 (Smíchov) | 33     | 3 022                            | 9 817                          | 2 811                          | 12 628                           | Ne             | 666                     | 4              |
| Praha 5 (Smíchov) | 34     | 3 344                            | 9 925                          | 2 704                          | 12 629                           | Ano            | 792                     | 4              |
| Praha 5 (Smíchov) | 35     | 4 157                            | 11 363                         | 3 917                          | 15 280                           | Ne             | 903                     | 3              |
| Praha 5 (Smíchov) | 36     | 6 510                            | 17 212                         | 3 842                          | 21 054                           | Ne             | 1 126                   | 6              |
| Praha 5 (Smíchov) | 37     | 6 018                            | 14 334                         | 3 548                          | 17 882                           | Ne             | 1 058                   | 8              |
| Praha 5 (Smíchov) | 38     | 5 012                            | 11 731                         | 3 008                          | 14 739                           | Ne             | 844                     | 2              |
| Praha 5 (Smíchov) | 39     | 4 446                            | 9 810                          | 3 972                          | 13 782                           | Ne             | 911                     | 3              |
| Praha 5 (Smíchov) | 40     | 1 058                            | 5 642                          | 3 077                          | 8 719                            | Ne             | 392                     | 4              |
| Praha 6 (Břevnov) | 41     | 1 933                            | 4 107                          | 1 051                          | 5 158                            | Ne             | 584                     | 4              |
| Praha 6 (Břevnov) | 42     | 1 816                            | 4 238                          | 1 427                          | 5 665                            | Ano            | 500                     | 2              |
| Praha 6 (Břevnov) | 43     | 1 992                            | 3 875                          | 1 399                          | 5 274                            | Ne             | 590                     | 2              |
| Praha 6 (Břevnov) | 44     | 2 915                            | 3 916                          | 1 724                          | 5 640                            | Ano            | 720                     | 2              |
| Praha 6 (Břevnov) | 45     | 2 187                            | 4 258                          | 1 844                          | 6 102                            | Ne             | 700                     | 3              |
| Praha 6 (Břevnov) | 46     | 2 994                            | 4 227                          | 1 372                          | 5 599                            | Ne             | 710                     | 3              |

|                   |     |       |        |       |        |     |       |   |
|-------------------|-----|-------|--------|-------|--------|-----|-------|---|
| Praha 6 (Břevnov) | 47  | 3 310 | 4 984  | 1 856 | 6 840  | Ne  | 820   | 4 |
| Praha 6 (Břevnov) | 48  | 3 479 | 5 873  | 2 150 | 8 023  | Ne  | 800   | 3 |
| Praha 6 (Břevnov) | 49  | 3 008 | 4 051  | 2 038 | 6 089  | Ne  | 705   | 4 |
| Praha 6 (Břevnov) | 50  | 3 199 | 3 997  | 2 383 | 6 380  | Ne  | 733   | 4 |
| Olomouc (město)   | 51  | 4 210 | 6 174  | 1 876 | 8 050  | Ne  | 910   | 6 |
| Olomouc (město)   | 52  | 3 368 | 3 285  | 984   | 4 269  | Ne  | 520   | 4 |
| Olomouc (město)   | 53  | 3 157 | 3 397  | 1 231 | 4 628  | Ne  | 585   | 4 |
| Olomouc (město)   | 54  | 2 889 | 5 811  | 2 007 | 7 818  | Ano | 690   | 6 |
| Olomouc (město)   | 55  | 2 917 | 6 923  | 1 985 | 8 908  | Ne  | 715   | 4 |
| Olomouc (město)   | 56  | 3 086 | 6 504  | 1 772 | 8 276  | Ne  | 740   | 5 |
| Olomouc (město)   | 57  | 2 854 | 6 060  | 1 338 | 7 398  | Ne  | 720   | 5 |
| Olomouc (město)   | 58  | 2 889 | 6 182  | 1 126 | 7 308  | Ano | 618   | 5 |
| Olomouc (město)   | 59  | 4 108 | 5 924  | 1 227 | 7 151  | Ne  | 540   | 4 |
| Olomouc (město)   | 60  | 2 050 | 4 886  | 1 355 | 6 241  | Ne  | 446   | 3 |
| Olomouc (venkov)  | 61  | 3 213 | 9 147  | 1 964 | 11 111 | Ano | 850   | 6 |
| Olomouc (venkov)  | 62  | 3 223 | 11 036 | 2 541 | 13 577 | Ano | 880   | 7 |
| Olomouc (venkov)  | 63  | 3 586 | 8 842  | 1 789 | 10 631 | Ne  | 888   | 7 |
| Olomouc (venkov)  | 64  | 4 830 | 11 275 | 2 635 | 13 910 | Ano | 1 012 | 9 |
| Olomouc (venkov)  | 65  | 4 082 | 9 941  | 1 824 | 11 765 | Ano | 1 025 | 9 |
| Olomouc (venkov)  | 66  | 4 115 | 9 873  | 1 779 | 11 652 | Ne  | 1 100 | 9 |
| Olomouc (venkov)  | 67  | 4 226 | 8 944  | 1 667 | 10 611 | Ano | 1 150 | 8 |
| Olomouc (venkov)  | 68  | 3 338 | 8 810  | 1 842 | 10 652 | Ano | 1 020 | 7 |
| Olomouc (venkov)  | 69  | 3 627 | 7 972  | 1 113 | 9 085  | Ano | 810   | 4 |
| Olomouc (venkov)  | 70  | 2 954 | 7 084  | 1 378 | 8 462  | Ne  | 775   | 6 |
| Brno (venkov)     | 71  | 2 515 | 4 837  | 904   | 5 741  | Ano | 450   | 3 |
| Brno (venkov)     | 72  | 3 126 | 6 911  | 1 485 | 8 396  | Ano | 630   | 3 |
| Brno (venkov)     | 73  | 3 271 | 8 005  | 1 882 | 9 887  | Ano | 710   | 4 |
| Brno (venkov)     | 74  | 2 964 | 8 186  | 1 913 | 10 099 | Ano | 705   | 4 |
| Brno (venkov)     | 75  | 2 995 | 7 232  | 1 564 | 8 796  | Ano | 605   | 3 |
| Brno (venkov)     | 76  | 4 814 | 10 964 | 2 497 | 13 461 | Ne  | 910   | 5 |
| Brno (venkov)     | 77  | 5 033 | 12 008 | 2 216 | 14 224 | Ano | 1 150 | 6 |
| Brno (venkov)     | 78  | 3 548 | 8 907  | 1 884 | 10 791 | Ne  | 800   | 4 |
| Brno (venkov)     | 79  | 3 227 | 8 883  | 1 955 | 10 838 | Ano | 800   | 4 |
| Brno (venkov)     | 80  | 3 288 | 9 156  | 1 929 | 11 085 | Ano | 705   | 3 |
| Brno (město)      | 81  | 2 016 | 7 345  | 1 882 | 9 227  | Ne  | 444   | 4 |
| Brno (město)      | 82  | 2 847 | 7 884  | 1 918 | 9 802  | Ne  | 460   | 4 |
| Brno (město)      | 83  | 2 998 | 8 926  | 1 537 | 10 463 | Ne  | 512   | 5 |
| Brno (město)      | 84  | 3 113 | 8 147  | 1 755 | 9 902  | Ne  | 666   | 5 |
| Brno (město)      | 85  | 3 245 | 10 023 | 1 991 | 12 014 | Ne  | 735   | 5 |
| Brno (město)      | 86  | 3 062 | 9 081  | 1 846 | 10 927 | Ne  | 700   | 5 |
| Brno (město)      | 87  | 3 127 | 8 942  | 2 020 | 10 962 | Ne  | 780   | 4 |
| Brno (město)      | 88  | 3 248 | 9 144  | 2 154 | 11 298 | Ne  | 712   | 4 |
| Brno (město)      | 89  | 3 640 | 8 352  | 1 843 | 10 195 | Ne  | 600   | 4 |
| Brno (město)      | 90  | 4 071 | 7 224  | 1 689 | 8 913  | Ano | 500   | 3 |
| Karlovy Vary      | 91  | 4 226 | 9 147  | 2 064 | 11 211 | Ano | 810   | 6 |
| Karlovy Vary      | 92  | 4 077 | 8 633  | 1 985 | 10 618 | Ne  | 700   | 6 |
| Karlovy Vary      | 93  | 3 992 | 8 725  | 1 995 | 10 720 | Ne  | 640   | 7 |
| Karlovy Vary      | 94  | 3 178 | 6 667  | 1 638 | 8 305  | Ne  | 490   | 5 |
| Karlovy Vary      | 95  | 3 882 | 6 910  | 1 784 | 8 694  | Ano | 510   | 4 |
| Karlovy Vary      | 96  | 3 564 | 6 544  | 1 772 | 8 316  | Ne  | 530   | 4 |
| Karlovy Vary      | 97  | 3 517 | 6 882  | 1 790 | 8 672  | Ano | 500   | 3 |
| Karlovy Vary      | 98  | 4 025 | 7 916  | 2 013 | 9 929  | Ano | 655   | 4 |
| Karlovy Vary      | 99  | 4 168 | 8 422  | 2 144 | 10 566 | Ne  | 700   | 4 |
| Karlovy Vary      | 100 | 2 982 | 6 338  | 1 536 | 7 874  | Ne  | 495   | 5 |

**Spotřeba energií u vybraného souboru bytů (soubor č. 1)**

| Zličín<br>Poř. č. | Plocha<br>(m <sup>2</sup> ) | Počet<br>bydlících | Spotřeba elektřiny<br>(kWh/rok) | Spotřeba tepla<br>(GJ/rok) |
|-------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1                 | 93,6                        | 3                  | 5 129                           | 10 833                     |
| 2                 | 91,5                        | 3                  | 5 484                           | 10 925                     |
| 3                 | 91,5                        | 1                  | 7 632                           | 11 764                     |
| 4                 | 95,9                        | 4                  | 6 976                           | 12 516                     |
| 5                 | 95,9                        | 4                  | 5 111                           | 12 317                     |
| 6                 | 95,9                        | 3                  | 4 467                           | 12 446                     |
| 7                 | 95,9                        | 3                  | 4 868                           | 11 817                     |
| 8                 | 85,4                        | 3                  | 3 975                           | 12 005                     |
| 9                 | 83,4                        | 3                  | 4 904                           | 10 993                     |
| 10                | 83,4                        | 3                  | 4 103                           | 10 384                     |
| 11                | 83,4                        | 1                  | 3 980                           | 10 712                     |
| 12                | 77,6                        | 1                  | 3 492                           | 9 946                      |
| 13                | 77,6                        | 2                  | 4 431                           | 10 808                     |
| 14                | 77,6                        | 2                  | 4 169                           | 9 778                      |
| 15                | 67,2                        | 3                  | 3 348                           | 8 850                      |
| 16                | 72,6                        | 3                  | 3 657                           | 9 931                      |
| 17                | 68,8                        | 3                  | 3 544                           | 10 277                     |
| 18                | 67,2                        | 3                  | 3 296                           | 11 004                     |
| 19                | 59,6                        | 2                  | 3 315                           | 11 290                     |
| 20                | 59,6                        | 3                  | 3 105                           | 11 335                     |
| 21                | 59,6                        | 1                  | 3 578                           | 11 816                     |
| 22                | 59,6                        | 2                  | 3 592                           | 11 623                     |
| 23                | 58,9                        | 1                  | 3 348                           | 11 011                     |
| 24                | 58,9                        | 1                  | 3 740                           | 9 887                      |
| 25                | 58,9                        | 2                  | 3 627                           | 9 022                      |
| 26                | 58,9                        | 2                  | 4 775                           | 9 188                      |
| 27                | 52,6                        | 2                  | 3 968                           | 10 219                     |
| 28                | 62,1                        | 2                  | 3 663                           | 10 383                     |
| 29                | 47,5                        | 1                  | 3 567                           | 9 415                      |
| 30                | 47,5                        | 2                  | 3 164                           | 9 811                      |
| 31                | 30,8                        | 1                  | 3 548                           | 9 964                      |
| 32                | 30,8                        | 1                  | 3 299                           | 9 702                      |
| 33                | 36,6                        | 1                  | 3 231                           | 8 816                      |
| 34                | 36,3                        | 1                  | 3 692                           | 9 001                      |
| 35                | 34,1                        | 1                  | 3 380                           | 9 236                      |
| 36                | 29,5                        | 1                  | 3 656                           | 8 832                      |
| 37                | 29,5                        | 1                  | 3 703                           | 8 154                      |
| 38                | 60,7                        | 1                  | 4 757                           | 10 093                     |

**Spotřeba energií u vybraného souboru bytů (soubor č. 2)**

| Olomouc<br>Poř. č. | Plocha<br>(m <sup>2</sup> ) | Počet<br>bydlících | Spotřeba elektřiny<br>(kWh/rok) | Spotřeba tepla<br>(GJ/rok) |
|--------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1                  | 127,5                       | 4                  | 6 441                           | 12 388                     |
| 2                  | 127,5                       | 5                  | 6 756                           | 12 906                     |
| 3                  | 100,9                       | 3                  | 6 902                           | 11 404                     |
| 4                  | 100,9                       | 3                  | 6 052                           | 11 386                     |
| 5                  | 100,9                       | 2                  | 6 753                           | 11 729                     |
| 6                  | 100,9                       | 3                  | 6 896                           | 12 155                     |
| 7                  | 100,9                       | 4                  | 7 185                           | 12 306                     |
| 8                  | 100,9                       | 1                  | 4 417                           | 12 781                     |
| 9                  | 100,9                       | 2                  | 5 104                           | 12 854                     |
| 10                 | 100,9                       | 2                  | 5 249                           | 12 862                     |
| 11                 | 98,1                        | 4                  | 4 829                           | 12 889                     |
| 12                 | 98,1                        | 4                  | 4 743                           | 12 237                     |
| 13                 | 98,1                        | 4                  | 4 021                           | 12 005                     |
| 14                 | 98,1                        | 4                  | 5 147                           | 12 854                     |
| 15                 | 98,1                        | 4                  | 5 244                           | 12 010                     |
| 16                 | 98,1                        | 3                  | 5 704                           | 12 937                     |
| 17                 | 98,1                        | 3                  | 6 076                           | 12 846                     |
| 18                 | 98,1                        | 3                  | 6 012                           | 11 545                     |
| 19                 | 95,6                        | 4                  | 4 937                           | 12 011                     |
| 20                 | 95,6                        | 5                  | 5 372                           | 12 374                     |
| 21                 | 88,1                        | 1                  | 4 045                           | 11 085                     |
| 22                 | 88,1                        | 2                  | 4 349                           | 11 233                     |
| 23                 | 88,1                        | 4                  | 4 044                           | 11 716                     |
| 24                 | 88,1                        | 4                  | 4 391                           | 11 827                     |
| 25                 | 86,6                        | 3                  | 5 136                           | 10 945                     |
| 26                 | 86,6                        | 3                  | 5 261                           | 12 082                     |
| 27                 | 86,6                        | 2                  | 4 972                           | 10 019                     |
| 28                 | 86,6                        | 2                  | 4 383                           | 10 376                     |
| 29                 | 86,6                        | 3                  | 5 349                           | 11 371                     |
| 30                 | 86,2                        | 1                  | 4 867                           | 9 955                      |
| 31                 | 86,2                        | 1                  | 4 336                           | 10 474                     |
| 32                 | 86,2                        | 3                  | 4 885                           | 12 064                     |
| 33                 | 74,9                        | 1                  | 3 792                           | 9 212                      |
| 34                 | 74,9                        | 4                  | 4 863                           | 11 334                     |
| 35                 | 74,9                        | 4                  | 5 507                           | 11 507                     |
| 36                 | 74,9                        | 3                  | 4 149                           | 10 426                     |
| 37                 | 74,9                        | 3                  | 4 866                           | 9 732                      |
| 38                 | 74,9                        | 3                  | 5 495                           | 11 308                     |
| 39                 | 74,9                        | 2                  | 4 991                           | 11 663                     |
| 40                 | 74,9                        | 3                  | 4 386                           | 11 541                     |
| 41                 | 68,5                        | 3                  | 4 435                           | 11 092                     |
| 42                 | 68,5                        | 3                  | 3 748                           | 9 842                      |
| 43                 | 68,5                        | 3                  | 4 648                           | 10 360                     |
| 44                 | 68,5                        | 2                  | 4 811                           | 10 424                     |
| 45                 | 64,2                        | 3                  | 4 424                           | 10 957                     |
| 46                 | 64,2                        | 3                  | 5 325                           | 11 308                     |
| 47                 | 64,2                        | 3                  | 4 079                           | 10 942                     |
| 48                 | 64,2                        | 3                  | 4 352                           | 10 017                     |
| 49                 | 60,8                        | 3                  | 3 976                           | 10 164                     |
| 50                 | 60,8                        | 3                  | 3 635                           | 9 922                      |

|    |      |   |       |        |
|----|------|---|-------|--------|
| 51 | 54,4 | 3 | 4 943 | 9 841  |
| 52 | 54,4 | 2 | 4 916 | 8 915  |
| 53 | 54,4 | 2 | 4 024 | 9 156  |
| 54 | 54,4 | 2 | 3 983 | 7 384  |
| 55 | 56,3 | 3 | 3 715 | 7 992  |
| 56 | 56,3 | 1 | 3 716 | 7 151  |
| 57 | 49,8 | 1 | 4 147 | 8 344  |
| 58 | 49,8 | 3 | 4 220 | 9 478  |
| 59 | 49,8 | 3 | 4 504 | 9 926  |
| 60 | 49,8 | 2 | 4 961 | 9 018  |
| 61 | 49,8 | 2 | 5 155 | 9 735  |
| 62 | 49,8 | 2 | 5 248 | 10 059 |
| 63 | 49,8 | 2 | 4 183 | 9 538  |
| 64 | 49,8 | 2 | 3 709 | 9 066  |
| 65 | 36   | 2 | 3 631 | 9 154  |
| 66 | 36   | 2 | 4 820 | 10 712 |
| 67 | 34,4 | 2 | 4 530 | 9 958  |
| 68 | 34,4 | 2 | 4 740 | 9 884  |
| 69 | 34,4 | 1 | 4 065 | 8 956  |
| 70 | 34,4 | 2 | 4 117 | 8 077  |
| 71 | 32,2 | 2 | 4 143 | 8 912  |
| 72 | 32,2 | 2 | 4 984 | 9 276  |
| 73 | 32,2 | 1 | 4 352 | 8 032  |
| 74 | 32,2 | 1 | 3 661 | 8 276  |
| 75 | 32,2 | 1 | 3 978 | 8 351  |
| 76 | 32,2 | 1 | 5 288 | 9 256  |
| 77 | 29,9 | 1 | 4 837 | 9 319  |
| 78 | 29,1 | 1 | 4 272 | 8 545  |

## Abstrakt

Efektivní využívání obnovitelných zdrojů energie je důležitým příspěvkem do energetické bilance společnosti. Nicméně, dosud není znám statistický model trhu obnovitelných energií, jenž by fundovaně objasnil relevantní ekonomické zákonitosti spojené s využitím těchto perspektivních energetických zdrojů. Přitom jsou již více než dvacet let k dispozici statistické údaje na světovém trhu zejména v oblasti využívání solární energetiky (fotovoltaika a termosolární ohřev). V této práci na základě ekonomických modelů nabídky a poptávky analyzujeme statistická data o prodeji fotovoltaických modulů a termosolárních kolektorů na světovém trhu obnovitelných energií. Zatímco model konstantní poptávky popisuje exponenciální růst prodejů a instalací, charakteristický pro počáteční období využívání těchto obnovitelných energetických zdrojů, popisuje model variabilní elasticity reálnější situaci na trhu, kde již dochází ke zpomalování nebo zrychlování kumulativních prodejů a tím i ke změně cenových relací. Jednoduchý růstový model neomezené poptávky založený pouze na růstu prodejů není realistický a dlouhodobě nemůže být funkční. Elasticita trhu je reálný ekonomický parametr, jenž reprezentuje procentuální nárůst nebo pokles trhu v daném čase; v modelu variabilní elasticity nahrazujeme konstantní elasticitu funkcí závislou na objemu trhu, ceně a času, můžeme tedy určit modelové parametry pro různé stavy trhu: růst, nasycení, pokles. V zobecněném tržním modelu kromě elasticity uvažujeme též funkci představující kapitálovou přiměřenost v čase.

Odhad parametrů modelu jsme použili pro výpočty kapitálové přiměřenosti fotovoltaických a termosolárních projektů realizovaných na trhu obnovitelných energií. Zobecněný model jsme použili pro věrohodnou předpověď vývoje trhu s obnovitelnými energiemi do roku 2020; rovněž jsme výpočty rozšířili i na ostatní obnovitelné zdroje (vodní a větrná energetika, geotermální zdroje, biomasa) a stanovili ceny energie vyrobené z těchto obnovitelných zdrojů. Možné energetické úspory jsme odhadli u domácností (byty a rodinné domy), které mohou být relevantními spotřebiteli energií z obnovitelných zdrojů. Za tím účelem jsme provedli statistická šetření na náhodně vybraných souborech, kdy jsme zjistili reálné údaje o spotřebě energií. Námi provedené statistické šetření umožnilo provést reálný odhad příspěvků obnovitelných energií do celkové energetické bilance. Prokázali

jsme, že pro trh obnovitelných energií je postačující uvažovat lineárně rostoucí kapitálovou časovou funkci s růstem 2,5 až 3%, což odpovídá i průměrnému růstu celkové energetické bilance. Podíl obnovitelných energií na celkové bilanci se bude zvyšovat: v roce 2015 to bude 15% na světovém trhu a v SRN dokonce 16%. V České republice je reálně dosažitelný příspěvek 8% v roce 2015 s perspektivou 11% v roce 2020. Při tomto příspěvku obnovitelných zdrojů energií do celkové energetické bilance se sníží emise CO<sub>2</sub> do ovzduší o tři (v roce 2015), resp. čtyři (v roce 2020) miliony tun. Dosažení tohoto stavu predikuje námi aplikovaný statistický model trhu obnovitelných energií.

### **Klíčová slova**

Analýza statistických údajů, statistické šetření, model variabilní elasticity, zobecněný model, modelová parametrizace, extrapolace, interakce, obnovitelné zdroje, energie, fotovoltaika

## **Abstract**

An efficient application and development of renewable energy sources is one of the most important contribution to the energetic balance of the human society. Anyhow, statistical model of the renewable energy market, which would fundamentally explain relevant economical rules related to these perspective energetic resources, is not clearly known up to now. Nevertheless, the relevant statistical data concerning application of solar energy (photovoltaic and thermo-solar heating) are available for the last twenty years. Based on the economic models, statistical data concerning sales of photovoltaic models and thermo-solar collectors sales have been analysed in this work. It has been shown that the model of constant elasticity predicts an exponential increase which will slow down when a certain level of annual cumulative sales was reached. The model of constant elasticity was found to be successful to interpret past sales data. In the approach of variable elasticity model the parameter of the elasticity has been modified as a function of variables such as market volume, price and time through the statistical evaluation. It enabled to calculate initial, saturation and competitive market conditions, as well. Whereas the constant elasticity demand model describes exponential growth of sales and installations, which was characteristic for the beginning of the application of these renewable resources of energy, the variable elasticity demand model describes a more realistic situation, where cumulative sales either increase or decrease and prices vary subsequently. Simple growth model of unlimited demand based on the growing sales is not realistic and could not be feasible in the long term. The market elasticity could be understood as a real economical parameter representing percentual market increase or decrease at a given time; in the variable demand elasticity model, the constant elasticity is replaced by a function of a market volume, price and time. In this case, we can estimate model parameters for the different market conditions: growth, saturation and decrease. The function representing the capital adequacy in the generalized market model has also been deliberated.

Statistical models have been used to determine cumulative sales and market prices of photovoltaic modules and thermo-solar collectors. Moreover, model parameters have been used for the calculation of the realized photovoltaic and thermo solar projects' capital adequacy on the renewable energy market. By using

model parameters, renewable energy market forecast up to 2020 has been estimated. We have used generalized market model to credibly estimate future renewable energy market until 2020; as well as extend model parameterization on other resources of renewable energy (water and wind, geothermal sources, biomass) and set prices of energy produced from these renewable sources. Potential energetic savings have been estimated for households (apartments and private houses), who can be relevant consumers of energy from renewable sources. We have performed statistical findings on randomly selected files, where we have reached a real energy consumption, to prove this. This research allowed us to perform a real estimate of a renewable energy contribution to the total energy balance. We have successfully proved that linearly growing capital adequacy function, with an annual growth between 2.5% and 3.0%, is reflecting the renewable energy market sufficiently and is fully in line with an average growth of the total energy consumption. Renewable energy share on the total energy balance will grow substantially to reach a level of 15% in 2015 on the world market and a level of 8% in the Czech Republic for the same period with a perspective to reach a level of 11% in 2020 respectively. Assuming this level of renewable energy on the total production will lead to a decrease of CO<sub>2</sub> emissions by three million of tones in 2015 and by four million of tones in 2020. Final reach of this status quo is fully predicted by our statistical model for renewable energy market.

## **Keywords**

Analysis of statistical data, statistical research, variable elasticity model, generalized model, model parameterization, extrapolation, interaction, renewable sources, energy, photovoltaic

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že doktorskou práci na téma

***Statistické modely trhu obnovitelných energií***

jsem vypracoval samostatně.

Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v příloženém seznamu literatury.

V Praze, dne 3. května 2010

.....  
Ing. Petr Kozma