



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## DLOUHODOBÉ ENERGETICKÉ MODELOVÁNÍ

THE LONG-TERM ENERGY PLANNING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ivana Pallová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

BRNO 2019



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Studentka:** Ivana Pallová

**ID:** 173719

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Dlouhodobé energetické modelování

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Studium teoretických podkladů k metodě MARKAL a TIMES
2. Analýza dat a jejich aplikování na případný model
3. Provedení analýzy v prostředí LEAP a jejich vyhodnocení
4. Celkové zhodnocení

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce - IEEE, Scopus, zkušenosti provozovatelů.

**Termín zadání:** 4. ~~2.~~ 2019

**Termín odevzdání:** 27. ~~5.~~ 2019

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

PALLOVÁ, I. *Dlouhodobé energetické modelování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019, 45 stran. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Dlouhodobé energetické modelování jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 27. 5. 2019

.....

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá dlouhodobým energetickým modelováním. Teoretická část práce se věnuje vysvětlení a popisu hlavních částí ekonometrických modelů a jejich porovnáním. Následně je zde popis modelovacího softwaru LEAP. Praktická část je zaměřena na analýzu dat a jejich využití pro vytvoření modelu energetického systému České republiky. V další části je uveden popis vytváření modelu s informacemi o vstupních datech a jejich předpokládaném vývoji do roku 2040. Poslední část se věnuje kontrole a zhodnocení výsledků z modelovacího softwaru LEAP.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** MARKAL; TIMES; ekonometrický model; LEAP; energetický model

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with long-term energy modeling. The theoretical part of the thesis is devoted to the explanation and description of the main parts of econometric models and comparison of these models. Then explains a description of LEAP modeling software. The practical part is focused on data analysis and their use for creating model of the energy system of the Czech Republic. The next part describes the creation of the model with information about input data and their expected progression until 2040. The last part is devoted to control and evaluation of results from LEAP modeling software.

**KEY WORDS:** MARKAL; TIMES; econometric model; LEAP; energy model

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>2 ENERGETICKÉ MODELY .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 TOP-DOWN.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 BOTTOM-UP .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 HYBRIDNÍ PŘÍSTUPY .....</b>	<b>12</b>
<b>2.4 HLAVNÍ PARADIGMA.....</b>	<b>14</b>
2.4.1 EXPLICITNÍ TECHNOLOGIE .....	14
2.4.2 MULTIREGIONÁLNÍ .....	14
2.4.3 ČÁSTEČNÁ ROVNOVÁHA.....	14
<b>3 NÁSTROJE PRO MODELOVÁNÍ.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 MARKAL – MARKET ALLOCATION .....</b>	<b>15</b>
3.1.1 ZÁKLADNÍ STRUKTURA.....	16
3.1.2 KLÍČOVÉ SLOŽKY MODELU MARKAL.....	16
3.1.3 ČASOVÝ HORIZONT .....	17
3.1.4 REFERENČNÍ ENERGETICKÝ SYSTÉM .....	17
<b>3.2 TIMES – THE INTEGRATED MARKAL-EFOM SYSTEM .....</b>	<b>18</b>
3.2.1 MODELOVÁ STRUKTURA .....	18
3.2.2 TŘI ZÁKLADNÍ ENTITY MODELU TIMES.....	19
3.2.3 FUNKČNOST .....	19
3.2.4 VÝSTUPY.....	20
<b>3.3 SROVNÁNÍ MODELŮ MARKAL A TIMES.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4 METIS.....</b>	<b>22</b>
<b>4 LEAP – LONG-RANGE ENERGY ALTERNATIVES PLANNING .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1 INTEGROVANÉ PLÁNOVÁNÍ .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2 MODELOVACÍ METODY .....</b>	<b>23</b>
<b>4.3 ČASOVÝ RÁMEC .....</b>	<b>23</b>
<b>4.4 ANALÝZA SCÉNÁŘŮ.....</b>	<b>23</b>
<b>4.5 POČÁTEČNÍ POŽADAVKY .....</b>	<b>23</b>
<b>4.6 NÁSTROJE PRO VYTVÁŘENÍ MODELŮ .....</b>	<b>24</b>
<b>4.7 ZOBRAZENÍ VÝLEDKŮ.....</b>	<b>24</b>
<b>4.8 ENERGETICKÁ BILANCE .....</b>	<b>24</b>
<b>5 ENERGETICKÁ PREDIKCE ČESKÉ REPUBLIKY.....</b>	<b>25</b>
<b>5.1 VÝBĚR MODELOVACÍHO PROSTŘEDÍ .....</b>	<b>25</b>
5.1.1 VSTUPNÍ DATA PROGRAMU.....	25
<b>5.2 ZÁKLADNÍ ÚDAJE A SCÉNÁŘ.....</b>	<b>25</b>

---

5.2.1 KATEGORIE KEY ASSUMPTION.....	27
5.2.2 KATEGORIE DEMAND .....	27
5.2.3 KATEGORIE TRANSFORMATION.....	36
5.2.4 KATEGORIE RESOURCES .....	37
<b>5.3 ZADÁNÍ NOVÉHO SCÉNÁŘE.....</b>	<b>37</b>
5.3.1 VÝSTAVBA NOVÉHO JADERNÉHO BLOKU .....	37
5.3.2 VÝSTAVBA PLYNOVÝCH ELEKTRÁREN.....	38
5.3.3 PODPORA DECENTRALIZACE VÝROBY .....	39
<b>5.4 ZHODNOCENÍ.....</b>	<b>40</b>
<b>5.5 OSTATNÍ VÝSLEDKY.....</b>	<b>43</b>
<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>44</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>45</b>

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 3-1: Částečný pohled na jednoduchý referenční energetický systém .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3-2: Dosažení tržní rovnováhy v modelu TIMES.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-3: Schéma modelu TIMES .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5-1: Zobrazení vytvořeného modelu .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 5-2: Vytvořená stromová struktura modelu pro Českou republiku .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 5-3: Spotřeba energie v domácnostech.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 5-4: Spotřeba elektrické energie pro města .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5-5: Spotřeba elektrické energie pro vesnice.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 5-6: Celková spotřeba elektrické energie v domácnostech.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 5-7: Procentní rozdělení osobní silniční a železniční dopravy.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5-8: Procentní rozdělení nákladní silniční a železniční dopravy.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5-9: Předpokládaný nárůst elektromobilů do roku 2040.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5-10: Spotřeba elektrické energie v dopravě.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5-11: Spotřeba elektrické energie v průmyslu .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5-12: Spotřeba elektrické energie v ostatních sektorech .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5-13: Spotřeba elektrické energie pro jednotlivé sektory .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5-14: Vývoj výroby při základním scénáři .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5-15: Navýšení výroby z jaderných elektráren .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5-16: Navýšení výroby z jaderných elektráren a přidání plynových zdrojů .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 5-17: Navýšení výroby z jaderných elektráren a solárních elektráren.....</i>	<i>40</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 5-1: Základní údaje o České republice .....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 5-2: Spotřeba elektrické energie pro města .....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 5-3: Spotřeba elektrické energie pro vesnice .....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 5-4: Celková spotřeba elektrické energie v domácnostech .....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 5-5: Procentní rozdělení osobní silniční a železniční dopravy .....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 5-6: Procentní rozdělení nákladní silniční a železniční dopravy .....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 5-7: Spotřeba elektrické energie v průmyslu .....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 5-8: Spotřeba elektrické energie v ostatních sektorech .....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 5-9: Spotřeba elektrické energie pro jednotlivé sektory .....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 5-10: Procentní rozdělení výroby elektrické energie .....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 5-11: Výroba elektrické energie při procentním rozdělení pro základní scénář .....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 5-12: Výroba elektrické energie pro první scénář .....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 5-13: Výroba elektrické energie pro druhý scénář .....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 5-14: Výroba elektrické energie pro třetí scénář .....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 5-15: Bilance elektrické energie pro rok 2010 .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 5-16: Bilance elektrické energie pro rok 2040 (základní scénář) .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 5-17: Bilance elektrické energie pro rok 2040 (první scénář) .....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 5-18: Bilance elektrické energie pro rok 2040 (druhý scénář) .....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 5-19: Bilance elektrické energie pro rok 2040 (třetí scénář) .....</i>	<i>42</i>

## **SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

RES	Referenční energetický systém
ETSAP	Energy technology systems analysis program
IEA	International energy agency
LEAP	Long-range Energy Alternatives Planning System

# 1 ÚVOD

V dnešní době, kdy je snaha snižovat velikost emisí a je velká podpora výroby elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů, je velice důležité mít dlouhodobý energetický plán. Tyto plány ale ve většině případech jsou jako černé skříňky. Data z nichž se vychází nejsou dostupná a výsledky jichž bylo dosaženo jsou sdělovány zkrácené.

Není to však pravidlem pro veškeré modely. Existují organizace, které podporují iniciativu, aby vytvářené modely byly přístupné a s konkrétními počátečními informacemi.

Dále stojí za zmínku dlouhodobé energetické plánování v Nizozemí. V této zemi mají studenti k dispozici potřebný software s počátečními daty pro co nejkvalitnější pochopení celkového systému a vlivů jeho částí na sebe navzájem.

V této práci se proto zabývám konkrétně ekonometrickými modely MARKAL a TIMES, což jsou energetické/ekonomické/environmentální modely. Byly vyvinuty v rámci Energy Technology Systems Analysis Programme a měla ho na starost Mezinárodní agentura pro energii. V současné době modely využívají v 70 zemích a mnoha institucích.

Cílem této práce je vypracovat rešerši, ve které jsou shrnuté charakteristické znaky pro oba ekonometrické modely - jejich funkce, využití a vzájemné srovnání modelů. Dále se zabývám vytvořením energetického modelu pro Českou republiku pomocí programu LEAP, který se využívá pro dlouhodobé energetické modelování. S tím souvisí analýza vstupních dat a následné zhodnocení výsledků dosažených pomocí tohoto programu.

## 2 ENERGETICKÉ MODELY

Mnoho energetických modelů je v současné době používáno po celém světě a každý z nich je navržen tak, aby zdůrazňoval konkrétní aspekt zájmu. Rozdíly zahrnují ekonomické odůvodnění, úroveň rozdělení rozhodovacích proměnných, časový horizont, nad kterým jsou přijímána rozhodnutí, a geografický rozsah. Jedním z nejvýznamnějších rozdílných rysů mezi energetickými modely je míra požadované.

### 2.1 Top-down

Každý sektor je zastoupen výrobní funkcí navrženou tak, aby simulovala potenciální náhrady mezi hlavními faktory produkce, která je soustředěná do několika proměnných (energie, kapitál a práce) při výrobě v každém odvětví. V této kategorii modelů se nachází řada národních nebo globálních energetických systémů.

Tyto modely se obvykle nazývají top-down, protože představují celou ekonomiku prostřednictvím poměrně malého počtu souhrnných proměnných a rovnic. V těchto modelech jsou parametry výrobní funkce vypočítané pro každý sektor tak, aby vstupy a výstupy reprodukovaly jednoduchou základnu historického roku.

### 2.2 Bottom-Up

Na druhém konci spektra jsou velmi podrobné, technologicky explicitní modely, které se primárně zaměřují na energetický sektor. V těchto modelech je každá důležitá technologie využívající energii definována podrobným popisem jejích vstupů, výstupů, jednotlivých nákladů a několika dalších technických a ekonomických charakteristik. V těchto bottom-up modelech se odvětví skládá z (obvykle velkého) počtu logicky uspořádaných propojených technologií, pomocí jejich vstupů a výstupů. Některé modely bottom-up vypočítají částečnou rovnováhu maximalizací celkového čistého přebytku, zatímco ostatní simulují jiné typy chování ekonomických činitelů. V modelech bottom-up je produkována jedna jednotka sektorového výstupu (např. počet ujetých kilometrů těžkého nákladního automobilu) pomocí kombinace výstupů jednotlivých technologií. Proto je výrobní funkce sektoru implicitně konstruována, spíše než výslovně uvedena. Takové výrobní funkce mohou být poměrně složité v závislosti na složitosti referenčního energetického systému (RES) každého sektoru.

### 2.3 Hybridní přístupy

Zatímco výše uvedené rozdělení se uplatňovalo poměrně dobře u dřívějších modelů, tyto rozdíly jsou nyní poněkud smazány pokroky v obou modelech. V případě modelů top-down obsahuje několik modelů obecné rovnováhy spravedlivé rozdělení paliv a technologií v klíčových odvětvích produkujících energii (například výroba elektřiny, zásobování ropou a plynem). Na rozdíl od toho se pokročilejší modely bottom-up snaží zachytit některé efekty celé ekonomiky na energetický systém.

Model TIMES má požadavky na konečné využití (včetně poptávky po průmyslové produkci), které jsou citlivé na své vlastní ceny, a tím zachycuje dopad růstu cen energií. Mnoho technologicky bohatých modelů (včetně TIMES) jsou multiregionální a jsou tak schopny zvážit dopady energetických rozhodnutí na obchod. Je třeba poznamenat, že zatímco multiregionální modely top-down vždy zastupovaly obchod, dělaly to s velmi omezeným množstvím komodit - obvykle jedna nebo dvě, i když může existovat spousta obchodovaných energetických forem a

materiálů v multiregionálních modelech bottom-up. Navzdory těmto pokrokům v obou modelech zůstávají důležité rozdíly.

Konkrétně:

- Modely top-down zahrnují makroekonomické proměnné mimo odvětví energetiky jakou jsou mzdy a úrokové sazby
- Modely bottom-up mají veliké množství různých technologií (stávajících a/nebo budoucích) dostupných k uspokojení potřeb energie a často mají schopnost sledovat mnohem širší rozmanitost obchodovaných komodit.

Koncepce top-down a bottom-up není jediným relevantním rozdílem mezi energetickými modely. U modelů top-down se výpočtové rovnováhy výrazně liší od makroekonomických modelů. Ty druhé nevypočítají rovnovážná řešení, ale spíše simulují toky kapitálu a ostatních veličiny mezi sektory. Využívají ekonometricky odvozených koeficientů vstup-výstup pro výpočet dopadu na hlavní sektorové ukazatele. Proměnné v sektorech jsou pak dosazeny do národních ukazatelů spotřeby, úrokové sazby, HDP apod.

Mezi technologicky explicitními modely se obvykle rozlišují dvě hlavní třídy: první třídou je model parciálních rovnovážných modelů, jako jsou MARKAL a TIMES, které používají optimalizační techniky pro výpočet nejméně nákladné (nebo maximální přebytkové) cesty pro energetický systém. Druhou třídou je model simulací, kde je kladen důraz na představení systému, který není řízen čistě finančními náklady a zisky.

V těchto simulačních modelech jsou přijatá investiční rozhodnutí založena pouze na maximalizaci zisku. [2][4]

## 2.4 Hlavní paradigma

### 2.4.1 Explicitní technologie

Každá technologie bývá popsána řadou technických a ekonomických parametrů. Tedy je výslovně definována a odlišuje se od všech ostatních v modelu. Model může zahrnovat několik tisíc technologií ve všech oblastech energetického systému (přenos a konečné využití energie) v každém regionu. Počet technologií a jejich relativní topologie lze libovolně měnit a to pouze prostřednictvím zadávání specifických dat, aniž by uživatel musel kdykoli upravovat rovnice modelu.

### 2.4.2 Multiregionální

Některé modely obsahují několik desítek modelů na regionální úrovni. Počet regionů v modelu je omezen pouze složitostí řešení. Jednotlivé regionální modely jsou propojeny proměnnými pro obchodování s energií a proměnnými pro obchodování s emisními povoleními. Propojovací proměnné transformují vyšší počet regionálních modelů na jeden víceregionální (případně globální) energetický model. Akce prováděné v jednom regionu mohou ovlivnit všechny ostatní regiony. Tato funkce je nezbytná, když se simulují globální a regionální energetické a emisní modely.

### 2.4.3 Částečná rovnováha

Model počítá částečnou rovnováhu na trzích s energiemi. To znamená, že model vypočítá jak toky energetických forem a materiálů, tak i jejich ceny tak, že v cenách vypočítaných podle modelu poskytují dodavatelé energie částky, za které jsou spotřebitelé ochotni kupovat. Tato rovnováha je přítomna v každé fázi energetického systému: primární energie, sekundární energie a energetické služby. Model rovnováhy mezi nabídkou a poptávkou má jako svůj ekonomický důvod maximalizaci celkového přebytku, který je definován jako součet všech přebytků dodavatelů a spotřebitelů. Metoda používaná k maximalizaci přebytku musí být přizpůsobená konkrétním vlastnostem modelu, které jsou:

- výstupy technologie jsou lineární funkce vstupů;
- celkový hospodářský přebytek je maximalizován po celý časový horizont;
- trhy s energií jsou konkurenceschopné a s perfektní prognózou.

Výsledkem těchto předpokladů jsou následující vlastnosti:

- tržní cena každé komodity se rovná její mezní hodnotě v celém systému;
- každý ekonomický subjekt maximalizuje svůj vlastní zisk nebo užitek [2][4].

## 3 NÁSTROJE PRO MODELOVÁNÍ

Při rešeršní činnosti vzhledem ke studiu problematiky modelování MARKAL a TIMES byla objevena iniciativa The Open Energy Modelling Initiative (openmod), která zastřešuje projekty a vývojová prostředí v energetice. Jedná se zejména o projekty tzv. open-source, nebo-li otevřeného softwaru. Výhodou použití těchto prostředků je dostupnost relevantních dat a některých simulací [15].

MARKet ALlocation (MARKAL) a The Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES) jsou nástroje pro analýzu energetických, ekonomických a environmentálních faktorů. Mohou simulovat všechny transportní technologie, obnovitelnou energii a různé energetické sítě. MARKAL dokáže identifikovat nejméně nákladné energetické systémy, nákladově efektivní postup na snížení emisí a dlouhodobé vyvážení energie v různých scénářích. MARKAL/TIMES se používá v různých výzkumech v energetické oblasti, palivových článků a jaderné energie. Byl využit Evropskou komisí k analýze zlepšení energetické účinnosti, klimatických změn a rozvoje obnovitelné energie [5].

Long-range Energy Alternatives Planning system (LEAP) je používaným softwarovým nástrojem pro analýzu energetické politiky a pro hodnocení zmírňování změny klimatu.

LEAP se rychle stává v podstatě standardem pro země, které provádějí integrované plánování zdrojů a hodnocení emisí skleníkových plynů. Mnoho zemí se rozhodlo ho použít k vytvoření energetických a emisních scénářů, jako součást svých programů při podávání zpráv o změnách klimatu v rámci Pařížské dohody, která má omezit emise skleníkových plynů po roku 2020.

Je jedním z prvních nástrojů pro modelování energie, který se zabýval vlivem růstu energetických systémů na životní prostředí prostřednictvím přidání databáze životního prostředí a zlepšením výpočtu emisí. V roce 1992 byla zveřejněna první celosvětová studie o energetice s využitím programu LEAP [9].

Vzhledem k vysokému využití po celém světě a předpokládanému stálému vývoji se tento program zvolil pro modelování energetické situace v České republice. Jelikož se nejedná o open-source, byla využita možnost studentské licence.

### 3.1 MARKAL – MARKet ALlocation

Základní komponenty v modelu MARKAL jsou specifické typy energie nebo technologie pro regulaci emisí. Každá je reprezentována sadou charakteristik. Nabídka stávajících i budoucích technologií je součástí modelu. Strany nabídky a poptávky jsou propojené, takže jedna strana automaticky reaguje na změny druhé. Model vybírá kombinace technologií, které minimalizují náklady na celkový energetický systém.

Na rozdíl od technicko-ekonomických modelů bottom-up nevyžaduje MARKAL – ani neumožňuje – určení opatření na snižování emisí skleníkových plynů jako vstup do modelu. Model si sám zvolí preferované technologie.

Obvykle se provádí více modelových cyklů, které zkoumají řadu budoucích alternativních možností. Model vyžaduje jako vstup požadavky na energetickou službu a předpokládané náklady na zdroje. Pak je definován referenční případ, v němž například nejsou vyžadována

žádná opatření ke snížení emisí oxidu uhličitého. Poté se uskuteční série postupů s postupným snižováním emisí: emise stabilizované na současné úrovni, snížené o 10 %, 20 % apod.

V každém případě model najde nejméně nákladnou kombinaci technologií, aby splnil tento požadavek – až do výše proveditelnosti – ale s každým dalším omezením se zvýší celkové náklady na energetický systém. Celkové budoucí náklady na snižování emisí se tak počítají podle toho, jak rozsáhlé tato omezení jsou. Mohou být vykresleny jako průběžné křivky snížení nákladů. Kromě toho jsou stanoveny mezní náklady na snížení emisí v každém časovém období.

To je zvláště zajímavé pro stanovení politiky snižování emisí, protože může být interpretováno jako částka uhlíkové daně, která by byla potřebná k dosažení této úrovně snižování emisí.

Model MARKAL můžeme využít:

- K určení nejmenších energetických systémů.
- K určení nákladově efektivních reakcí na omezení emisí.
- Vyhodnocení nové technologie a priority pro výzkum a vývoj.
- Vyhodnocení účinků předpisů, daní a dotací.
- Inventarizace emisí skleníkových plynů.
- Odhadnutí hodnoty regionální spolupráce [1].

### 3.1.1 Základní struktura

Je užitečné rozlišovat mezi strukturou modelu a jeho konkrétním příkladem implementace. Struktura modelu představuje příklad jeho základního přístupu reprezentovat a analyzovat problém - nemění se z jedné implementace na další.

MARKAL modely pro různé oblasti mají stejnou strukturu. Jelikož je MARKAL řízen pomocí dat, tak se bude každý model lišit, jelikož se liší vstupní data. Struktura modelu je nakonec definována proměnnými a rovnicemi určenými z datového vstupu poskytnutého uživatelem. Tato informace společně definuje každou databázi regionálních modelů MARKAL, a tedy výsledné matematické znázornění pro každý region. Samotná databáze obsahuje jak kvalitativní, tak i kvantitativní údaje.

Kvalitativní údaje zahrnují například seznamy nosičů energie, technologie, použitelné (v každém regionu) v určitém časovém horizontu, stejně jako environmentální emise, které mají být sledovány.

Kvantitativní údaje naopak obsahují předpoklady technologických a ekonomických parametrů specifické pro každou technologii, oblast a časové období. Při konstrukci multiregionálních modelů je často k dispozici technologie, která může být použita ve dvou odlišných regionech, avšak náklady a výkonnostní předpoklady mohou být zcela odlišné. Tato část popisuje kvalitativní i kvantitativní předpoklady modelového systému MARKAL.

### 3.1.2 Klíčové složky modelu MARKAL

Energetická ekonomika modelu se skládá z výrobců a spotřebitelů energetických nosičů. MARKAL stejně jako většina modelů ekonomické rovnováhy předpokládá dokonale konkurenceschopné trhy pro výrobce nosičů energie, kteří maximalizují své zisky a spotřebitelé maximalizují svou kolektivní užitečnost. Výsledkem je rovnováha mezi nabídkou a poptávkou, která maximalizuje čistý celkový přebytek (tj. součet přebytků producentů a spotřebitelů).

MARKAL se však může odchýlit od dokonale konkurenčních tržních předpokladů zavedením uživatelsky definovaných specifických předpokladů, jako jsou omezení technologického pronikání, rychlost zavádění nových technologií, atd.

MARKAL konfiguruje energetický systém (ze souboru oblastí) v určitém časovém horizontu tak, aby minimalizoval čisté celkové náklady (nebo ekvivalentně maximalizoval čistý celkový přebytek) systému, přičemž vyhovoval určitému počtu omezení. MARKAL je obecně provozován dynamicky, což znamená, že všechna investiční rozhodnutí jsou prováděna v každém období s plnou znalostí o budoucích událostech. Kromě časových období (obvykle 5 nebo 10 let) MARKAL rozeznává 3 sezóny a dvě denní divize (den, noc). Tato časová rozdělení mají za následek šest časových úseků. Časové úseky jsou uznávány pouze pro technologie, které vyrábějí elektřinu (sezónní a denní) nebo teplo při nízkých teplotách (sezónní), které se nemusí snadno skladovat a proto vyžadují jemnější rozložení času než jiné nosiče energie. V důsledku toho jsou tyto dva nosiče energie v každém časovém období rozděleny na 6 nebo 3 dob. Navíc je pro tyto dva nosiče energie uložen špičkový požadavek, který musí mít dostatečnou dodatečnou schopnost pro instalaci, aby vyhověl požadavku na špičku.

### 3.1.3 Časový horizont

Časový horizont je rozdělen na uživatelem zvolený počet časových období, přičemž každé období modelu má stejný počet let. V MARKALu se každý rok patřící do dané doby považuje za totožný. Energetické toky a úrovně emisí uváděné ve výsledcích představují roční toky v každém z pěti let obsažených v daném období. Důležitou výjimkou je, že investice daného období se předpokládají na počátku každého období s výslednou instalovanou kapacitou, která je k dispozici během tohoto období.

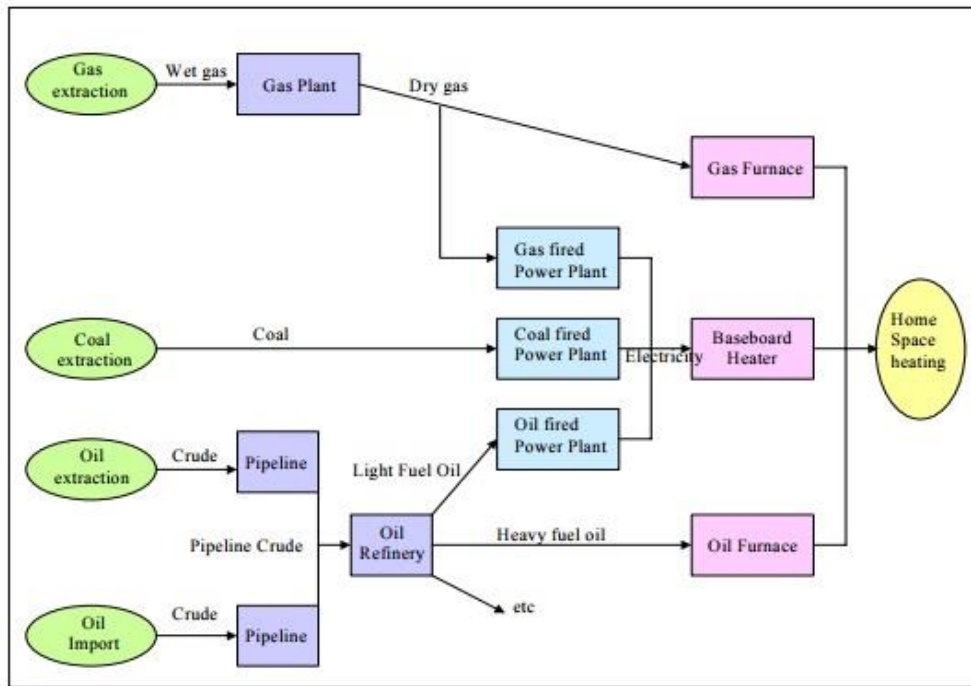
### 3.1.4 Referenční energetický systém

Energetická ekonomika MARKALu se skládá z:

- Požadavky, které představují energetické služby (např. Vytápění prostorů, ujeté kilometry), které musí systém uspokojit.
- Zdroje energie (těžba nebo dovoz), které představují metody získávání různých nosičů energie.
- Technologie (procesy), které buď přeměňují energetický nosič na jinou formu nebo na užitečnou energetickou službu.
- Komodity sestávající z nosičů energie, energetických služeb, materiálů a emisí, které jsou buď vyráběny nebo spotřebovány energetickými zdroji, technologií a požadavky.

Strukturální hranice referenčního energetického systému se skládají z energetických služeb a energetických zdrojů, které nejsou specifikovány jako fixní předpoklady, ale jako křivky nabídky (pro zdroje energie) a křivky poptávky (pro energetické služby). Časové limity jsou počáteční období (když je popsán původně existující systém) a konec horizontu.

Je užitečné shrnout vztahy mezi těmito různými subjekty pomocí síťového schématu [2].



Obr. 3-1: Částečný pohled na jednoduchý referenční energetický systém [2]

### 3.2 TIMES – The Integrated MARKAL-EFOM System

Generátor modelů TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM Systém) byl vyvinut jako součást IEA-ETSAP (Program pro analýzu energetických technologických systémů), mezinárodního společenství, které využívá dlouhodobé energetické scénáře pro provádění hloubkových energetických a environmentálních analýz. Kombinuje dva různé doplňující se systematické přístupy k modelování energie: přístup technického inženýrství a ekonomický přístup. TIMES je technologicky bohatý generátor modelů bottom up, který využívá lineární programování k vytvoření nejméně nákladného energetického systému optimalizovaného podle řady omezení uživatelů v střednědobém až dlouhodobém časovém horizontu. Jednoduše řečeno, TIMES se používá ke "zkoumání možných energetických budoucností na základě kontrastních scénářů".

#### 3.2.1 Modelová struktura

Modely TIMES zahrnují všechny kroky od primárních zdrojů přes řetězec procesů, které přeměňují, dopravují, distribuují a přeměňují energii na dodávky energetických služeb požadovaných spotřebiteli energie. Na straně nabídky energie zahrnuje těžbu paliva, primární a sekundární výrobu a exogenní dovoz a vývoz. Prostřednictvím různých nosičů energie je energie dodávána na stranu poptávky, která je strukturována sektorově do obytných, zemědělských, obchodních, dopravních a průmyslových odvětví. Matematické, ekonomické a technické vztahy mezi energetickou stranou (výrobci) a poptávkou (spotřebitelé) jsou základem modelů TIMES.

### 3.2.2 Tři základní entity modelu TIMES

- Technologie

Technologie (procesy) jsou reprezentacemi fyzických zařízení, která transformují komodity do jiných komodit. Procesy mohou být primárními zdroji komodit (těžební postup) nebo transformační činnosti, jako jsou například elektrárny vyrábějící elektřinu, zařízení na zpracování energie a zařízení pro konečnou spotřebu (auta).

- Komodity

Komodity (včetně paliv) jsou nosiče energie, energetické služby, materiály, peněžní toky a emise. Komodita je vyráběna nebo spotřebována některou technologií.

- Komoditní toky

Komoditní toky jsou vazby mezi procesy a komoditami (výroba elektřiny z větru). Průtok má stejnou povahu jako komodita, ale je připojen k určitému procesu a představuje jeden vstup nebo výstup tohoto procesu.

Používají se k vybudování energetického systému, který charakterizuje danou zemi nebo region. Všechny modely TIMES mají referenční energetický systém, který je základním modelem energetického systému předtím, než je podstatně změněn buď pro určitou oblast nebo pro konkrétní scénář.

#### Scénáře

Základní principy získané z modelu TIMES se dosahují analýzou scénářů. Referenční energetický scénář je generován nejprve spuštěním modelu bez omezení. Tyto výsledky nejsou zpravidla zcela v souladu s národními energetickými prognózami (vytvořenými simulací budoucí poptávky po energii a nabídkou), zejména proto, že TIMES optimalizuje energetické systémy poskytující nejméně nákladné řešení.

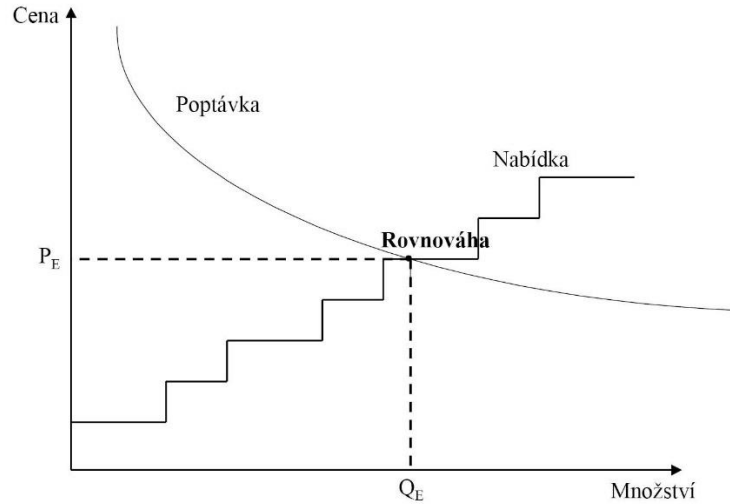
Druhý scénář je pak stanoven zavedením různých omezení (např. maximální množství emisí skleníkových plynů, minimální úroveň energetické bezpečnosti) a model vytváří jiný nejméně nákladný energetický systém s různými technologiemi a výběrem pohonných hmot. Když jsou výsledky porovnávány s výsledky referenčního scénáře, mohou být určeny různé možnosti technologií, které přinášejí omezení s minimálními náklady.

### 3.2.3 Funkčnost

Jakmile budou zavedeny všechny vstupy, omezení a scénáře, bude se model snažit vyřešit a určit energetický systém, který splňuje požadavky na energetickou službu v celém časovém horizontu za nejmenší cenu. Dělá to tím, že současně provádí rozhodnutí o investicích do zařízení a rozhodování o provozu, primární energii a obchodu s energií podle oblastí. TIMES předpokládá, že všechna investiční rozhodnutí jsou prováděna v každém období s plnou znalostí budoucích událostí. Optimalizuje se horizontálně (ve všech sektorech) a vertikálně (ve všech časových obdobích, pro která je limit stanoven).

Výsledkem bude optimální kombinace technologií a paliv v každém období spolu se souvisejícími, které splní poptávku. Model konfiguruje výrobu a spotřebu komodit (pohonných hmot, materiálů a energetických služeb) a jejich ceny; kdy se model shoduje s poptávkou, tj. výrobci energie jsou v rovnováze se spotřebiteli energie. Matematicky to znamená, že model maximalizuje přebytky výrobců a spotřebitelů. Model je nastaven tak, aby cena produkce

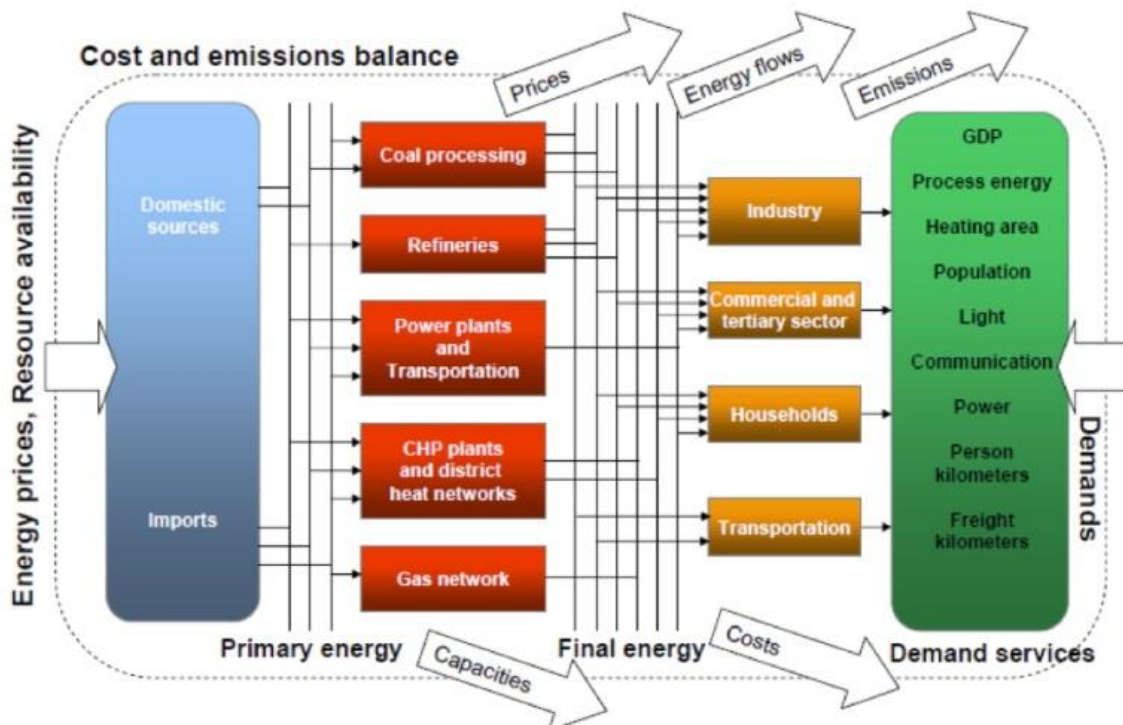
komodity ovlivňovala poptávku po této komoditě, zatímco poptávka ovlivňuje cenu komodity. Trh údajně dosáhl rovnováhy za ceny  $p$  a množství  $q$ , když žádný spotřebitel nechce koupit méně než  $q$  a žádný výrobce nechce vyrábět více než  $q$  za cenu  $p$ . Když jsou všechny trhy v rovnováze, je maximalizován celkový ekonomický přebytek tj. součet přebytků producentů a spotřebitelů.



Obr. 3-2: Dosažení tržní rovnováhy v modelu TIMES [3]

### 3.2.4 Výstupy

Hlavními výstupy TIMES jsou konfigurace energetických systémů, které splňují požadavky energetické služby na konečné spotřebě ze nejmenších nákladů a současně dodržují různá omezení (např. 80% snížení emisí). V první řadě model TIMES řeší otázku: je cíl dosažitelný? Pokud je energetický systém možný, pak je možné jej prověřit, za jakou cenu? Výstupy modelu jsou energetické toky, ceny energetických komodit, emise skleníkových plynů, kapacity technologií, náklady na energii a mezní náklady na snižování emisí [3].



Obr. 3-3: Schéma modelu TIMES [3]

### 3.3 Srovnání modelů MARKAL a TIMES

#### Podobnosti

Oba modely jsou technologicky explicitní, dynamické modely rovnováhy trhů s energií. V obou případech je rovnováha dosažena maximalizací celkového přebytku spotřebitelů a dodavatelů prostřednictvím lineárního programování. Tyto dva modely sdílejí také multiregionální funkci, která umožňuje vytvářet geograficky integrované instance.

Existují výrazné rozdíly mezi oběma modely, které však neovlivňují základní paradigma společné pro oba modely, spíše některé jejich technické rysy a vlastnosti.

#### Proměnlivá délka periody

Model MARKAL má pevně stanovenou délku periody. Nicméně TIMES umožňuje uživateli definovat délku periody zcela flexibilním způsobem. Jedná se o významný rozdíl v modelu, který rozhodně vyžadoval kompletní přehodnocení matematiky většiny omezení a funkcí TIMES.

Funkce proměnné délky periody je velmi užitečná ve dvou případech:

- Pokud si uživatel přeje použít jako počáteční období jeden rok (užitečné pro kalibrační účely)
- Když uživatel zvažuje dlouhé obzory, kde prvních několik period mohou být podrobně popsány za poměrně krátkou dobu (např. 5 let), zatímco delší doba může být přeskupena do několika období s dlouhou dobou trvání (20 nebo víc let).

#### Oddělování dat

Tato funkce značně zjednodušuje údržbu databáze modelů a umožňuje uživateli velkou flexibilitu při úpravě nové definice horizontu plánování. V TIMES jsou všechna vstupní data specifikována uživatelem nezávisle na definici časových úseků používaných pro konkrétní provoz modelu. Všechny časově závislé vstupní data jsou specifikovány podle roku ve kterém se používají. Model se pak postará o to, aby údaje odpovídaly obdobím kde jsou požadována. V případě potřeby jsou data interpolována (nebo extrapolována) kódem předprocesoru tak, aby poskytovala datové body v požadovaných časových periodách pro běžné provozování modelu. Kromě toho uživatel má kontrolu nad interpolací a extrapolací každé časové série.

Obecné pravidlo pro oddělování dat se aplikuje také na údaje z minulosti. Uživatel TIMES poskytuje technické údaje o nákladech v posledních letech, kdy se doopravdy uskutečnily investice a model se postará o výpočet, kolik kapacity zůstává v různých obdobích modelování. Údaje z minulosti a budoucnosti jsou tedy ošetřovány stejným způsobem. Jedna instance, kdy funkce oddělení dat značně zjednodušuje správu modelu je doba, kdy si uživatel přeje změnit počáteční období a/nebo délku periody. Tedy pouze nadeklarujeme data pro nové období. Kdežto v modelu MARKAL tato změna představuje větší úsilí vyžadující zásadní upravení databáze.

#### Základní příslušenství

V MARKALu mají pouze dvě komodity časové úseky: elektřina a teplota. Jejich časové úseky jsou přesně definovány. V TIMES každá komodita a proces mohou mít vlastní časové úseky vybrané uživatelem. Tyto flexibilní časové úseky se rozdělují do tří skupin: sezónní, týdenní a denní, kdy mohou být rozšířeny nebo vynechány. Flexibilní povaha časových úseků je podporována skladovacími procesy které „spotřebovávají“ komodity na jednom časovém úseku a dává je k dispozici na jiném. MARKAL podporuje pouze noční skladování elektřiny.

### **Flexibilní procesy**

V modelu MARKAL jsou procesy pevně definovány - s výjimkou některých speciálních procesů, které umožňují flexibilní výstupy – tedy vstupy a výstupy jsou ve vzájemném pevném poměru. V TIMES je situace opačná a každý proces začíná jako zcela flexibilní dokud uživatel neurčí koeficienty, které pevně propojí vstupy a výstupy. Tato funkce umožňuje lepší modelování mnoha procesů z reálného života, jako jediné technologie. MARKAL vyžaduje několik technologií ( stejně jako fiktivní komodity) k dosažení stejného výsledku.

### **Investice a náklady**

Nové parametry modelu TIMES umožňují uživateli modelovat fázi konstrukce a demontáže zařízení. Jedná se o dodací lhůty spojené s konstrukcí nebo demontáží zařízení, náklady na demontáž. Stejně jako v MARKALu existuje také možnost definovat toky komodit spotřebované v době konstrukce nebo uvolněné v době demontáže.

### **Přechodné proměnné**

MARKAL má velmi málo proměnných souvisejících s komoditami, a to vývozy / dovozy a emise. TIMES má velké množství proměnných souvisejících se zbožím, jako je: celková výroba, celková spotřeba, ale také specifické proměnné představující toky komodity vstupující do jednotlivých procesů nebo jejich ukončení. To umožňuje uživateli mnoho "úchytů" k tomu, aby stanovily limity a náklady na komodity [6].

## **3.4 METIS**

Pro modelování jak funguje evropský energetický systém, zejména trh s elektřinou a zemním plynem, vyvinula DG Energy model METIS. Cílem bylo mít vlastní nástroj, který může rychle poskytnout náhled a odpovědi na komplexní otázky z ekonomiky a energetiky, přičemž se zaměří na krátkodobé fungování energetického systému a trhů.

Používá ho Evropská komise k rozhodnutí o energetické politice. Tyto rozhodnutí vycházejí z důkladných analýz a používají se k vyhodnocení účinnosti politik a hodnocení potenciálních důsledků. Jedná se o energetický model pokrývající celý energetický systém pro elektřinu, plyn a teplo. Ve finální podobě by měl být schopen simulovat provoz systémů a trhů pro tyto energetické nosiče na hodinové úrovni po celý rok a za neurčitostí (zachycování změn počasí a dalších). Pracuje jako doplněk k dlouhodobým modelům energetických systémů, protože se zaměřuje na detailní simulaci konkrétního roku.

Přestože je tento nástroj určen k tomu, aby byl detailním výstupním nástrojem, významnou váhou je i jeho uživatelská přívětivost a rychlá provozuschopnost. Konečným cílem programu METIS je, že může být využíván nejen odbornými modeláři, ale také tvůrci politik a analýz. METIS má modulární strukturu, která usnadňuje rozšíření přidáním nových modulů nebo úpravu stávajících.

V současné době se METIS používá pro provádění cílených specifických analýz, souvisejících zejména s otázkami vyžadujícími vysokou geografickou a/nebo časovou rozmanitost [7].

## 4 LEAP – LONG-RANGE ENERGY ALTERNATIVES PLANNING

### 4.1 Integrované plánování

LEAP je integrovaný modelovací nástroj založený na scénářích, který lze použít ke sledování spotřeby energie, produkce a těžby. Kromě sledování emisí skleníkových plynů může být LEAP použit také pro analýzu emisí lokálních a regionálních znečišťujících látek a krátkodobých znečišťujících látek ovlivňujících klima, které jsou vhodné pro studium klimatických přínosů lokálního snižování znečištění ovzduší.

### 4.2 Modelovací metody

LEAP není model konkrétního energetického systému, ale nástroj, který lze použít k vytváření modelů různých energetických systémů, kde každý vyžaduje vlastní unikátní data. Zahrnuje řadu volitelných specializovaných metod. Poskytuje také řadu metod pro výpočet, simulaci a optimalizaci, které jsou vhodné pro modelování energetického sektoru a plánování jeho rozvoje. Proto musí také být dostatečně flexibilní, aby umožnily snadno zahrnout data a výsledky z dalších specializovaných modelů.

Modelovací schopnosti mají dvě základní koncepční úrovně. Na jedné úrovni jsou vestavěné výpočty. Na druhé úrovni uživatelé zadávají data, která mohou být použita pro specifikaci časově proměnlivých dat nebo pro vytváření dalších modelů s více proměnnými.

### 4.3 Časový rámec

Navržen je pro střednědobé a dlouhodobé modelování. Většina modelů zahrnuje i historické období a tudíž je možné použít schopnost nasimulovat budoucí vývoj určitého sektoru podle historických údajů. Většina vytvořených modelů se zabývá predikcí v rozmezí 20-50 let.

### 4.4 Analýza scénářů

Analytici mohou vytvářet a vyhodnocovat alternativní scénáře porovnáním jejich energetických požadavků, nákladů a přínosů a jejich dopadu na životní prostředí. Funkce správce scénářů, může být použita k popisu jednotlivých politických opatření, které lze pak různě kombinovat s dalšími vytvořenými. Tento přístup umožňuje vyhodnotit dopad jednotlivých změn, ke kterým dochází při kombinování více politik a opatření. Například součet výhod standardních opatření v kombinaci s různými změnami může být nižší než výhody jsou-li tyto změny a opatření zvažovány samostatně.

### 4.5 Počáteční požadavky

Velkou výhodou programu LEAP jsou jeho nízké počáteční požadavky na údaje. Mnoho modelovacích nástrojů se opírá o velmi konkrétní a často poměrně složité algoritmy řešení a tak mají tendenci mít jasně dané požadavky na údaje. Shromáždění potřebných dat pro takové modely je časově náročný úkol vyžadující relativně vysoké odborné znalosti. Naproti tomu má LEAP mnohem nižší počáteční požadavky na údaje a umožňuje svým uživatelům začít pracovat s vytvářením modelů založených na poměrně jednoduchých principech. Je vhodný pro uživatele,

který začíná tím, že vytváří co nejjednodušší počáteční analýzu. Později může upravit pouze část modelu, kde jsou k dispozici data a kde doplnění detailů poskytne další užitečné informace.

## 4.6 Nástroje pro vytváření modelů

LEAP obsahuje řadu vestavěných nástrojů, které usnadňují vytváření složitých modelů. Průvodce časovými úseky vám umožňuje vytvářet interpolace, krokové funkce a různé další prognózy buď přímým zadáním údajů, importováním dat nebo vytvořením odkazu na tabulku aplikace Excel.

Můžeme vytvářet složité modely, které používají rozsáhlou knihovnu vestavěných funkcí, stejně jako odkazy na další data a výsledky vypočítané v rámci programu LEAP, pomocí nástroje Expression Builder.

## 4.7 Zobrazení výsledků

Intuitivní a snadno použitelné zobrazení dosažených výsledků je dalším klíčovým prvkem programu LEAP, který pomáhá uživatelům vizualizovat, interpretovat výsledky a odstranit chyby. LEAP vypočítá obrovské množství výsledků, které lze zobrazit jako grafy a tabulky. Výsledky energetické náročnosti se vypočítají z: paliva, let, scénáře a odvětví. Uživatel si jednoduše vybere, co se zobrazí na každé ose grafu. Dál se uživatel může rozhodnout zobrazovat výsledky pouze pro jeden prvek nebo vybrané prvky. Například může vybrat požadované výsledky podle pohonných hmot a podle roku pro konkrétní region a scénář pro jeden sektor (např. domácnosti).

Výsledky mohou být zobrazeny téměř v jakékoliv jednotce měření díky automatickému převádění v rámci programu. K dispozici je řada možností nastavení, včetně volby typu grafu, barvy, číselného formátu, počet desetinných míst zobrazených v tabulkách apod. Všechny výsledky lze také exportovat: tabulky do aplikace Excel a grafy do aplikace PowerPoint nebo je uložit jako samostatné obrázky.

## 4.8 Energetická bilance

LEAP má schopnost automaticky generovat výsledky jako zprávy standardního formátu o energetické bilanci. Ty se podobají standardnímu formátu, který používá IEA a většina národních agentur pro energetické plánování. Energetické bilance mohou být zobrazeny ve formátu tabulky nebo diagramu a lze je přizpůsobit tak, aby shrnovaly informace pro podrobné nebo zjednodušené kategorie paliv pro různé roky nebo regiony. Výsledky energetické bilance mohou být také uvedeny podle sektorů nebo podsektorů v každé energetické jednotce [8].

## 5 ENERGETICKÁ PREDIKCE ČESKÉ REPUBLIKY

### 5.1 Výběr modelovacího prostředí

Pro modelování situace v České republice bylo vybráno prostředí softwaru LEAP, ve kterém byl vytvořen energetický model spotřeby/výroby elektrické energie do roku 2040. Tento program je založen na komerční bázi a je neustále vyvíjen a automaticky aktualizován. K přednostem programu patří vysoká variabilita a mezinárodní využití s ohledem na standard dat IEA [9].

Pro ukázkou možností vstupních parametrů budou pro sektor domácností zadávány vstupní hodnoty a jejich budoucí vývoj podrobněji a u sektoru průmyslu se využije možnost zadání pouze konečných hodnot spotřeby elektrické energie.

Na historických datech budou ověřeny správné algoritmy softwaru, které by se neměly příliš lišit od skutečných hodnot nebo pouze minimálně. Je to z důvodu neznalosti přesných algoritmů pro modelování, protože se jedná o uzavřený systém (lock-in), a proto je nutná zpětná kontrola, která by odhalila případné korekční činitele.

Poté se provede dlouhodobá analýza vývoje spotřeby a výroby elektrické energie v České republice v různých variantách s výhledem do roku 2040.

#### 5.1.1 Vstupní data programu

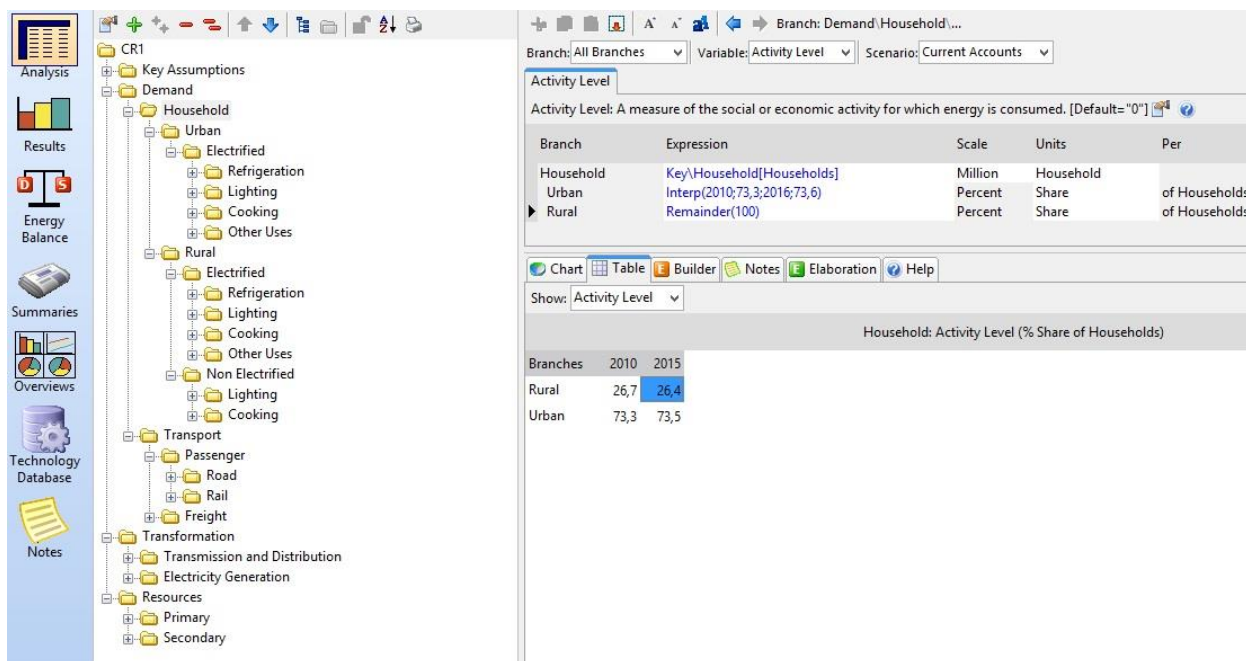
Stockholm Environment Institute (SEI) vyvinula řadu datových sad. Tyto počáteční data jsou určeny pro rozvojové země, aby sloužily jako startovací bod pro jejich energetické analýzy. Každý soubor dat obsahuje komplexní obraz historické poptávky a nabídky energie založený na databázi IEA World Energy Balances. Datové sady byly navrženy tak, aby odpovídaly údajům v energetických bilancích IEA, proto existují určité rozdíly a je nutné datové soubory ověřit, pro zajištění správných výsledků. Údaje o palivech jsou poskytovány v méně podrobných energetických bilancích IEA.

Ve vytvořeném modelu České republiky se výhradně zaměříme na požadavky elektrické energie v různých sektorech. To zahrnuje vyhledávání a analýzu různorodých dat pro tyto sektory, kde se může vyskytnout problém s nejednoznačným určením některých hodnot. Byla využita data z Energetického regulačního úřadu, Českého statistického úřadu a statistického úřadu Evropské unie, jejichž hodnoty se navzájem neliší o více než 3 %. Tyto zdroje jsou využity i pro kontrolu výstupních hodnot z programu LEAP pro historické období.

### 5.2 Základní údaje a scénář

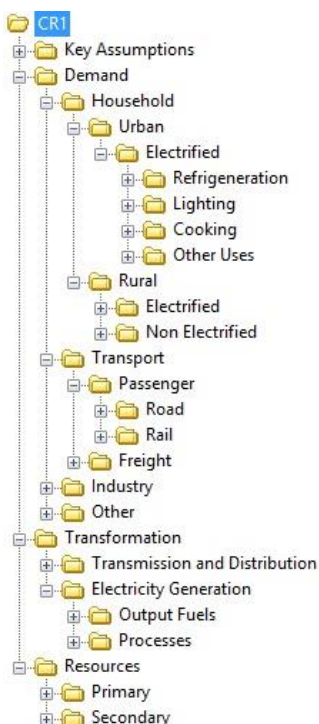
Jelikož je program v anglickém jazyku a budou z něj generovány grafy a tabulky, zůstane označení sektorů a položek nezměněno pro lepší přehlednost.

Ze všeho nejdříve se nastaví základní parametry modelu jako je země, pro kterou se daný energetický model vytváří. Zvolí se úroveň modelu (globální, národní, aj.), do kterého roku bude prováděna simulace apod. Následuje vytvoření stromové struktury a jednotlivých větví. Ty upravujeme dle potřeby a dostupných dat. Všechny údaje, nastavení a položky se mohou upravit kdykoliv v průběhu práce s modelem.



Obr. 5-1: Zobrazení vytvořeného modelu

V pravé části se zobrazují karty, které se vyplňují dle potřeby. Zde se nachází pouze karta Activity Level, představující procentní rozdělení *Rural* (vesnice) a *Urban* (města) v České republice. Tyto hodnoty máme možnost zobrazit jako graf, tabulku nebo k nim dopisovat poznámky což je patrné ze záložek pod tím.



Obr. 5-2: Vytvořená stromová struktura modelu pro Českou republiku

Je vidět, že ohledně přidání a odebrání položek ve stromové struktuře je ovládání programu velice jednoduché. Vytvořená stromová struktura je rozdělena do čtyř hlavních kategorií: *Key Assumptions*, *Demand*, *Transformation* a *Resources*. Každá z těchto kategorií a její vstupní data se vysvětlí níže.

### 5.2.1 Kategorie Key Assumption

Jako první je kategorie *Key Assumption*, zde se přidávají makroekonomické indikátory a další položky, které nemají jiné zařazení. Data zde mohou být pouze informativního charakteru (velikost příjmů České republiky, HDP), která se nemusí v modelu dále použít. Pro vyzkoušení co nejvíce funkcí programu LEAP se zadají hodnoty počtu obyvatel, domácností a počtu obyvatel na domácnost, které budeme následně dále využívat. Jinak tato kategorie může zůstat nevyplněná.

Předpoklady pro vývoj do roku 2040 jsou následující:

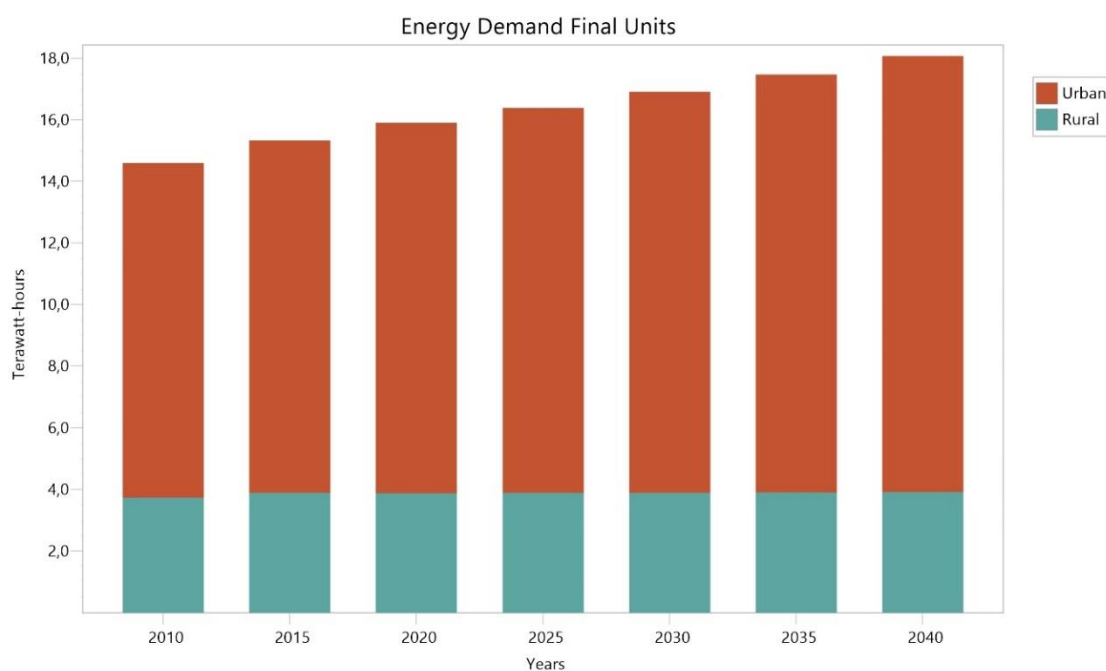
- Populace v České republice i nadále poroste.
- Počet domácností bude dále narůstat vlivem přibývajících počtu domácností čítajících 1-3 osoby (neúplné rodiny, jednotlivci).
- Počet obyvatel na jednu domácnost má klesající tendenci.

Tab. 5-1: Základní údaje o České republice

		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Population	(mil. People)	10,6	10,7	10,8	10,8	10,9	10,9	10,9
Household	(mil. Households)	4,423	4,644	4,709	4,733	4,758	4,782	4,807
Household size	(people)	2,4	2,3	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3

### 5.2.2 Kategorie Demand

Zde se vyplní větev *Household*, která je rozdělená na *Urban* a *Rural*. Nesmí se zapomínat na změnu jednotek, protože nejdříve se zadává celkové množství domácností a následně z toho určíme kolik procent je pro města a pro vesnice. Zadáme informaci o městech a pro vesnice použijeme funkci *Reminder*, tedy zbytek z celkového počtu domácností. Z toho důvodu bude vpravo u těchto informací uvedeno *Share*.



Obr. 5-3: Spotřeba energie v domácnostech

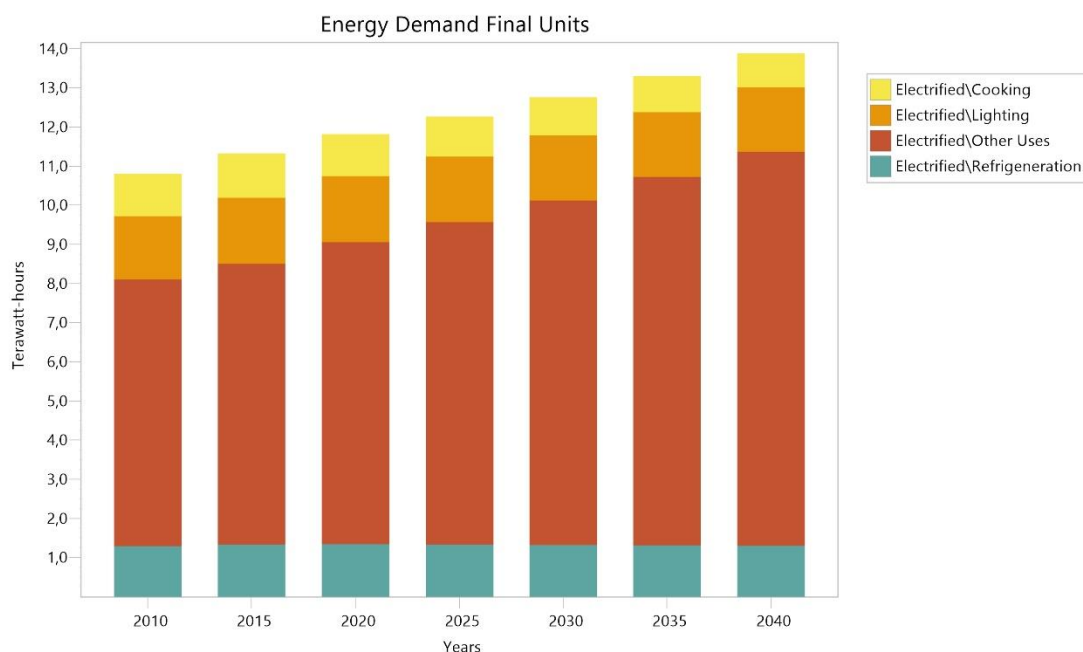
Z dostupných dat vyplývá, že přibližně 73,3 % obyvatelstva žije ve městech. Tato hodnota se bude do budoucna samozřejmě zvyšovat a to vlivem stěhování (nejčastěji za prací), proto se spotřeba elektrické energie nejvíce zvýší právě ve městech (Obr. 5-3).

Následně upřesníme spotřebu v domácnostech a její předpokládaný vývoj (Tab. 5-2, Tab. 5-3). Spotřeba energie se bude z důvodu vylepšování technologií sice snižovat, ale vzroste počet zařízení (například 2-3 televize aj.). Tyto zařízení společně s pračkou a myčkou jsou zastoupeny v položce *Other Uses*. Ačkoliv tedy spotřeba jednotlivých spotřebičů klesá, tak celková spotřeba elektrické energie v domácnostech má zvyšující charakter.

Pro názornost všech požadavků (ne jen elektrické energie) na domácnost jsou zde doplněny i spotřeby například zemního plynu při vaření. Předpokládaný vývoj je sestupný, protože očekáváme zvyšující se podíl využití elektrické energie.

Tab. 5-2: Spotřeba elektrické energie pro města

		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Urban								
Refrigeration	(TWh)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Lighting	(TWh)	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6
Cooking	(TWh)	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8
Other Uses	(TWh)	6,8	7,3	7,9	8,4	9,0	9,6	10,3
Total	(TWh)	10,8	11,4	12,0	12,4	12,9	13,5	14,1



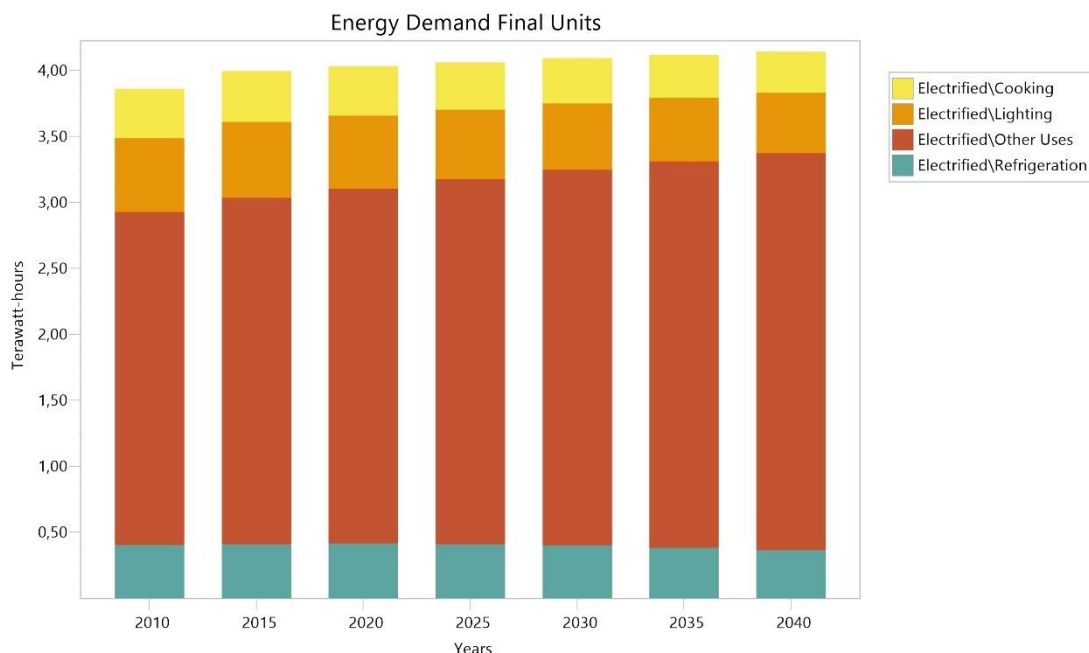
Obr. 5-4: Spotřeba elektrické energie pro města

Tyto stejné předpoklady se použijí i pro domácnosti na vesnicích. Ty mají obecně vyšší spotřebu, ale jejich podíl je pouze necelých 30 %. Jsou zde zahrnuté i neelektrifikované domácnosti (chaty), které v roce 2010 představují okolo pěti procent z domácností na vesnici a předpokládá se, že v roce 2040 to nebude více než jedno procento. Při tomto zadávání je potřeba správně definovat hodnoty. Například nepředpokládáme pokles spotřeby dřeva na topení, ale snížení počtu těchto domácností.

Dále například využití petroleje v elektrifikovaných domácnostech předpokládáme minimální a pouze v případě výpadku elektrické sítě.

Tab. 5-3: Spotřeba elektrické energie pro vesnice

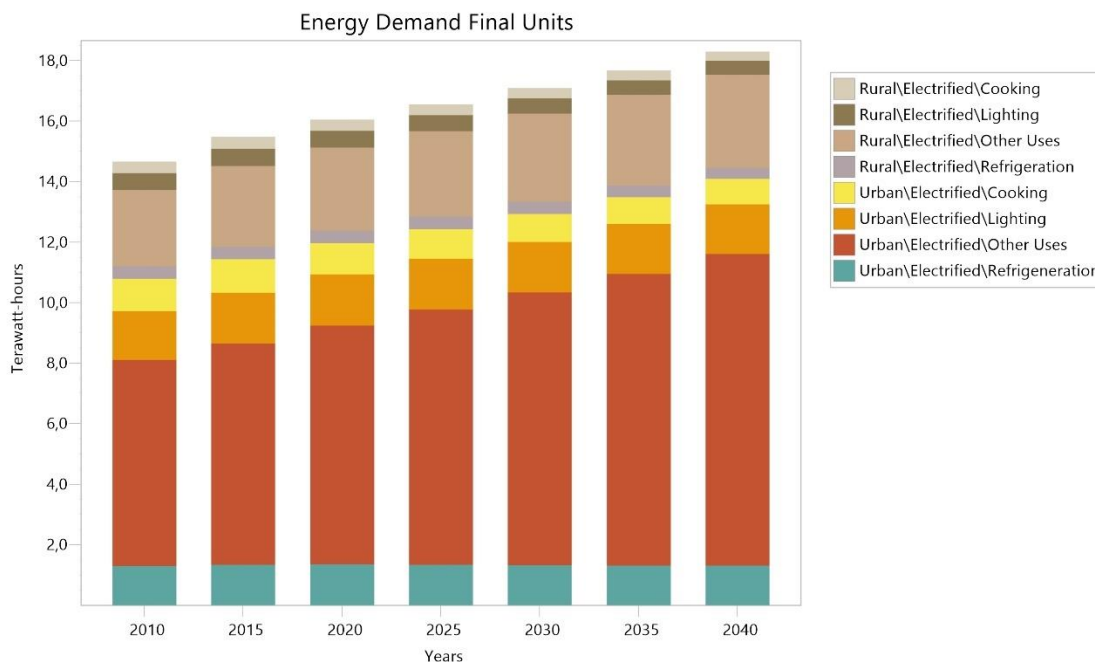
		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Electrified								
Refrigeration	(TWh)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Lighting	(TWh)	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Cooking	(TWh)	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
Other Uses	(TWh)	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1
Total	(TWh)	3,9	4,0	4,1	4,1	4,1	4,2	4,2



Obr. 5-5: Spotřeba elektrické energie pro vesnice

Tab. 5-4: Celková spotřeba elektrické energie v domácnostech

		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Urban								
Refrigeration	(TWh)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Lighting	(TWh)	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6
Cooking	(TWh)	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8
Other Uses	(TWh)	6,8	7,3	7,9	8,4	9,0	9,6	10,3
Rural								
Refrigeration	(TWh)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Lighting	(TWh)	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Cooking	(TWh)	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
Other Uses	(TWh)	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1
<b>Total</b>	<b>(TWh)</b>	<b>14,7</b>	<b>15,5</b>	<b>16,0</b>	<b>16,5</b>	<b>17,1</b>	<b>17,7</b>	<b>18,3</b>



Obr. 5-6: Celková spotřeba elektrické energie v domácnostech

Z hodnot Tab. 5-4 jasně vyplývá, že celková spotřeba elektrické energie v domácnostech se bude do roku 2040 zvyšovat.

Dále se vyplní větev *Transport*, která je rozdělená na *Passanger* (osobní doprava) a *Freight* (nákladní doprava). Osobní doprava se ještě rozliší jako silniční, do které jsou zahrnuty automobily a autobusy a železniční – vlaky. Stejně rozdělení se použije i u nákladní dopravy.

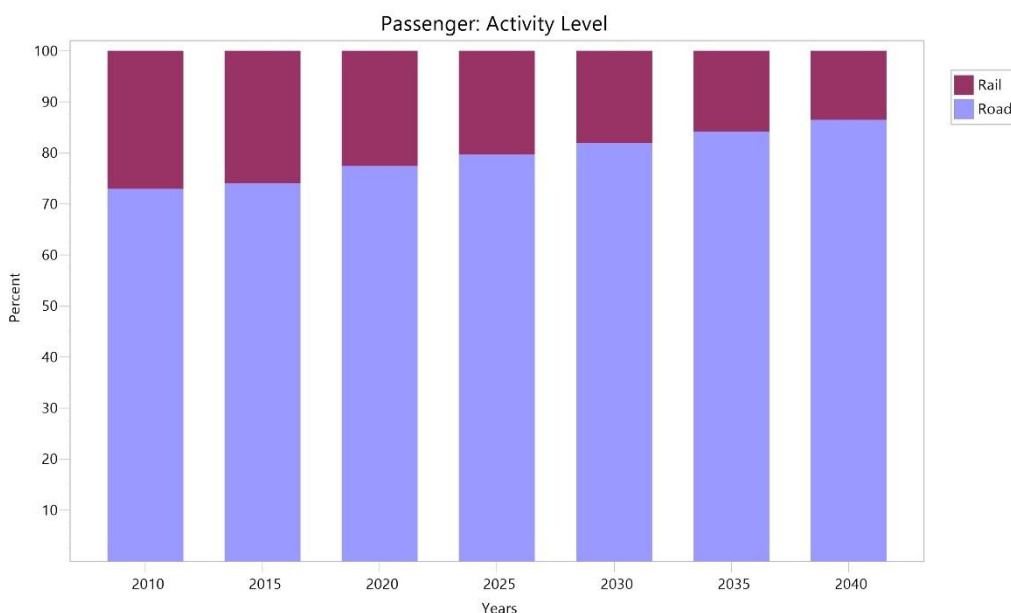
Zde je základní jednotkou osobokilometr – pro osobní dopravu a tunokilometr pro nákladní dopravu. Jejich hodnotu lze vypočítat vynásobením celkových najetých kilometrů a průměrného zatížení vozidla počtem osob (velikostí nákladu). V tomto případě jsou tyto informace dostupné a proto se nepočítají [10].

Předpoklady pro budoucí vývoj:

- Vyšší podíl elektromobilů na struktuře vozového parku v České republice.
- Celkový počet automobilů stále narůstá.
- Vyšší podíl elektrických lokomotiv z důvodu elektrifikace železničních tratí.

Tab. 5-5: Procentní rozdělení osobní silniční a železniční dopravy

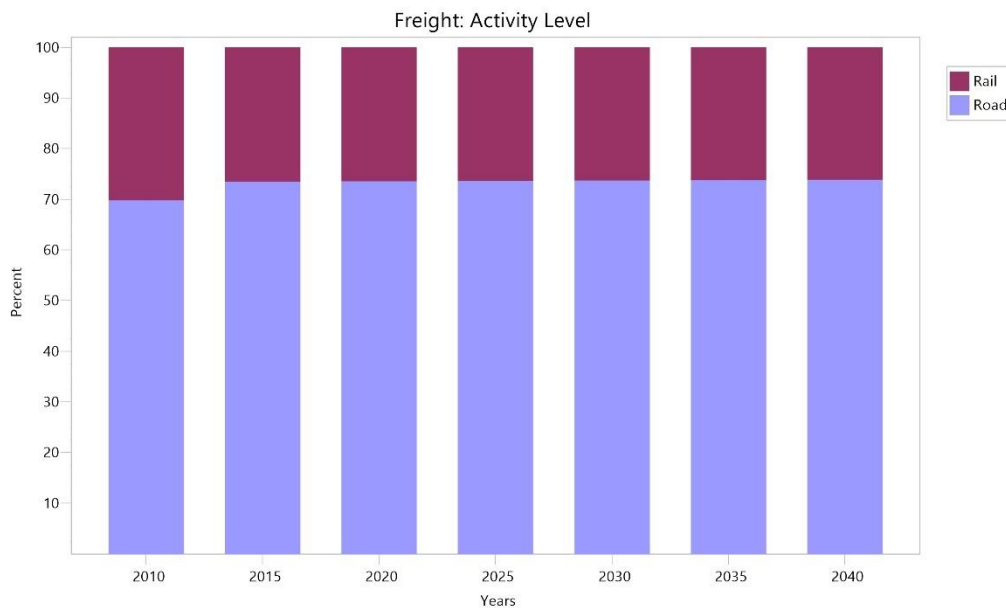
		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Rail	(%)	27,0	25,9	22,5	20,2	18,0	15,7	13,5
Road	(%)	73,0	74,1	77,5	79,7	82,0	84,2	86,5



Obr. 5-7: Procentní rozdělení osobní silniční a železniční dopravy

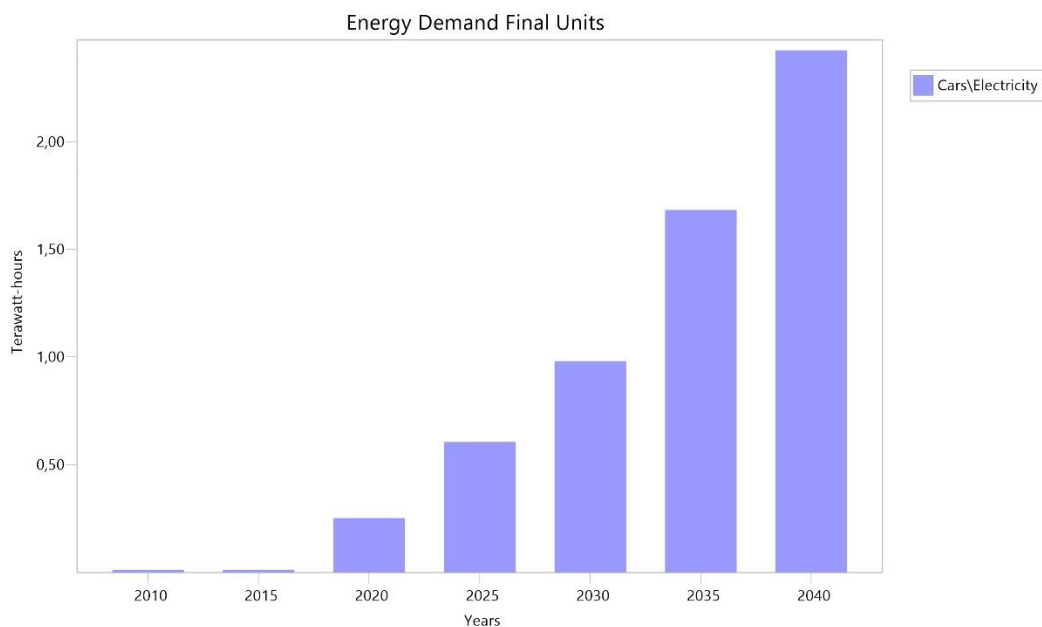
Tab. 5-6: Procentní rozdělení nákladní silniční a železniční dopravy

		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Rail	(%)	30,2	26,5	26,4	26,4	26,3	26,2	26,1
Road	(%)	69,8	73,5	73,6	73,6	73,7	73,8	73,9

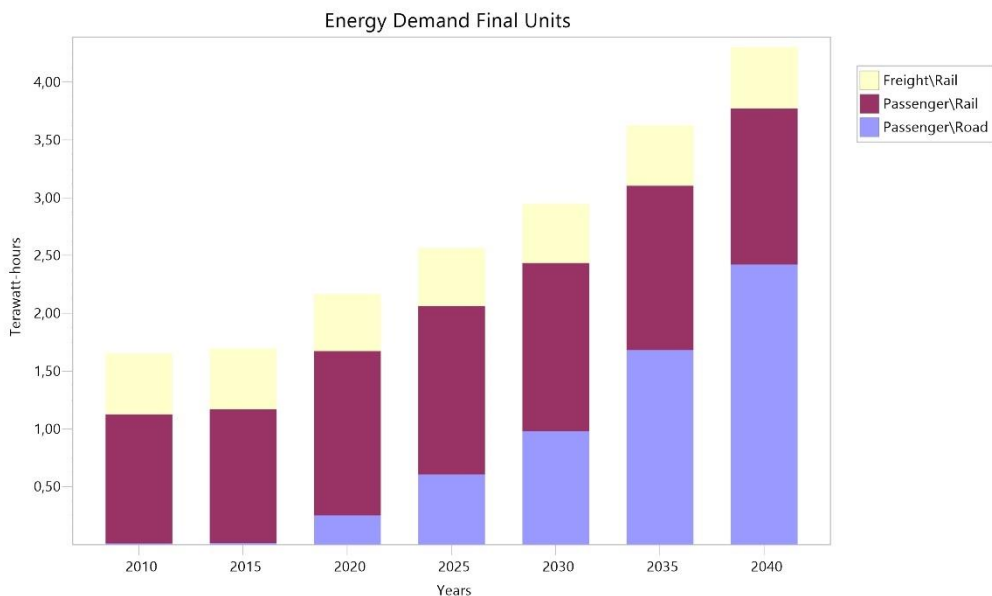


Obr. 5-8: Procentní rozdělení nákladní silniční a železniční dopravy

Z tabulek 5-5 jde vidět, že se u osobní dopravy snižuje podíl využití železnic. Opačná situace je v případě nákladní dopravy tabulka 5-6.



Obr. 5-9: Předpokládaný nárůst elektromobilů do roku 2040



Obr. 5-10: Spotřeba elektrické energie v dopravě

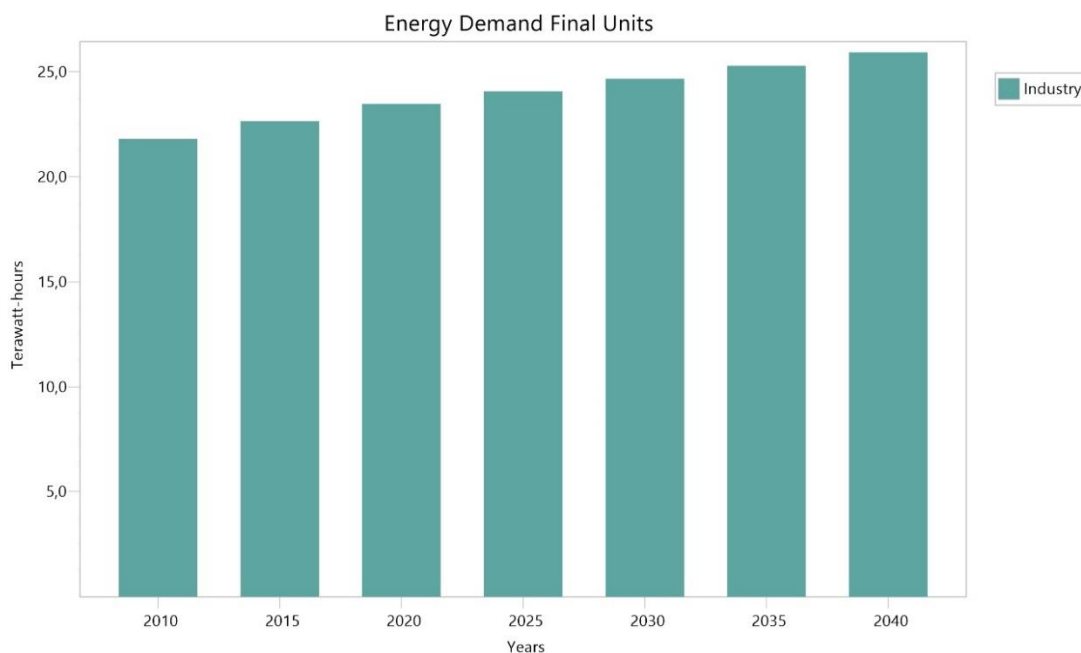
Jako vstupní data se zde mimo základní rozdělení použily hodnoty průměrné spotřeby dopravních prostředků a to v podobě ujetých kilometrů na jeden litr pohonné látky.

Celkový počet automobilů poroste, protože v dnešní době je standartní vlastnit více než jedno auto na domácnost. Nárůst zastoupení elektromobilů v osobní dopravě plyne z historických údajů, kdy v roce 2017 vzrostl počet elektromobilů o 50 % oproti roku 2016 [13]. Co se týká elektrických lokomotiv, předpokládá se pouze mírný nárůst z důvodu stálého využívání spalovacích lokomotiv.

Větev *Industry* je použita jako ukázka, že model nemusí být tak podrobný a složitý, ale jeho položka může být zadána zjednodušeně. V tomto případě je vyhledána celková hodnota spotřebované energie v průmyslu [10].

Tab. 5-7: Spotřeba elektrické energie v průmyslu

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Industry (TWh)	21,8	22,6	23,5	24,1	24,7	25,3	25,9
Total (TWh)	21,8	22,6	23,5	24,1	24,7	25,3	25,9



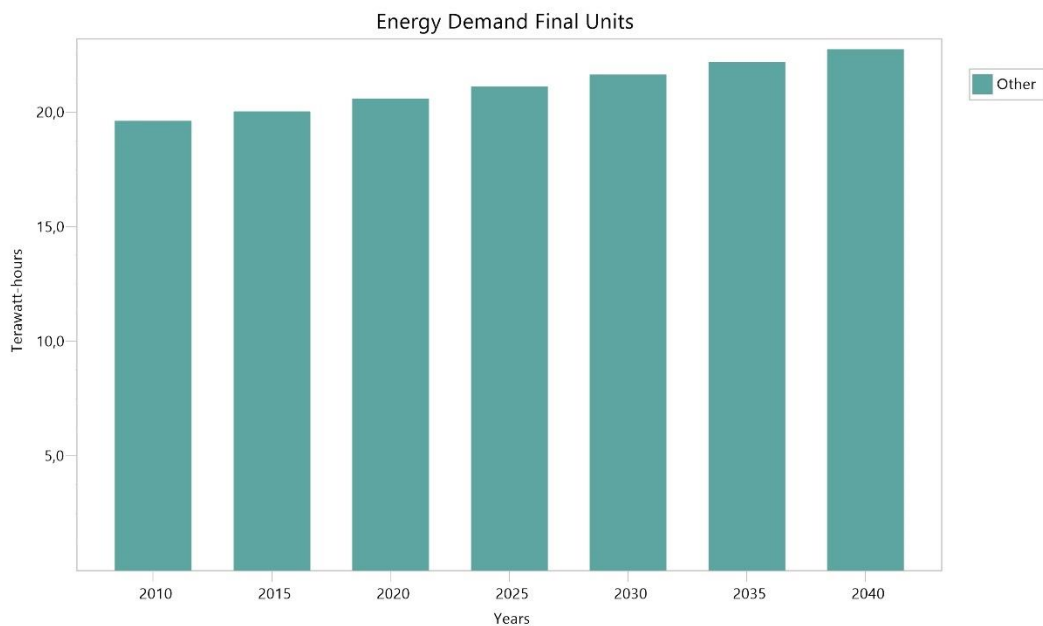
Obr. 5-11: Spotřeba elektrické energie v průmyslu

Z historických dat vyplývá, že stejně jako v dalších sektorech i zde předpokládáme zvyšující se poptávku po elektrické energii.

Jako poslední položka je v této kategorii vyplněna větev *Other*. Hodnoty jsou zadány stejně jako v předchozím případě - tedy konečné. Tato větev slouží jako zastoupení komerčního sektoru (kino, divadlo) a doplnění zbývajících požadavků na elektrickou energii [10].

Tab. 5-8: Spotřeba elektrické energie v ostatních sektorech

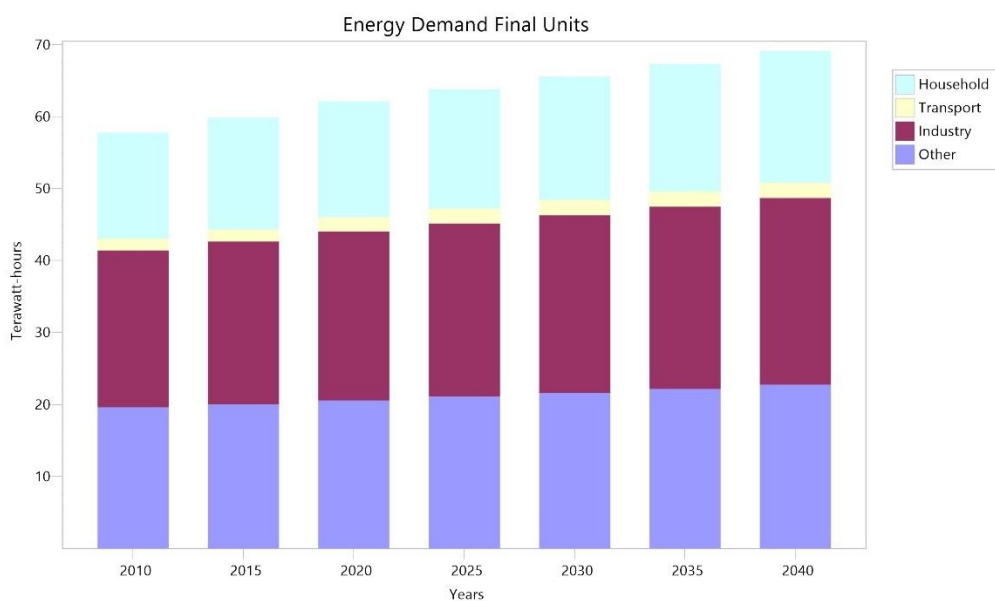
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Other (TWh)	19,6	20,0	20,6	21,1	21,6	22,2	22,8
Total (TWh)	19,6	20,0	20,6	21,1	21,6	22,2	22,8



Obr. 5-12: Spotřeba elektrické energie v ostatních sektorech

Tab. 5-9: Spotřeba elektrické energie pro jednotlivé sektory

		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Household	(TWh)	14,7	15,5	16,0	16,5	17,1	17,7	18,3
Transport	(TWh)	1,7	1,7	2,2	2,6	2,9	3,6	4,3
Industry	(TWh)	21,8	22,6	23,5	24,1	24,7	25,3	25,9
Other	(TWh)	19,6	20,0	20,6	21,1	21,6	22,2	22,8
Total	(TWh)	57,7	59,8	62,4	64,5	66,6	69,1	71,7



Obr. 5-13: Spotřeba elektrické energie pro jednotlivé sektory

Nyní je vytvořena první část modelu, která zahrnuje poptávku elektrické energie na území České republiky a její předpokládaný vývoj do roku 2040 (Tab. 5-9). Z obrázku 5-13 jde vidět zastoupení jednotlivých sektorů na požadavcích spotřeby elektrické energie.

### 5.2.3 Kategorie Transformation

Tato kategorie se rozdělí na *Transmission and Distribution* a *Electricity Generation*. Do větve *Transmission and Distribution* (přenos a distribuce) se zadávají energetické ztráty při přenosu. V České republice je to pro elektrickou energii 10 %. Nic jiného už se zde nevyplňuje. Pro zadání druhé větve – *Electricity Generation* se nejdříve zvolí algoritmus, podle kterého bude model pracovat.

.Na výběr jsou čtyři možnosti:

1. Procentní rozdělení s neomezenou kapacitou.
2. Určení jaký zdroj se přidá, ale LEAP na základě výpočtů určí kdy.
3. Určení jaký zdroj se přidá a kdy se přidá.
4. LEAP na základě zadaných informací určí kdy a jaký zdroj se přidá.

Zvoleno je procentní rozdělení s neomezenou kapacitou. Vytvoří se položky pro výrobu elektrické energie v České republice – větrné, jaderné, vodní, solární a uhelné elektrárny. Zde jsou zadávány účinnosti jednotlivých procesů. Dále se zde nepoužijí přímo hodnoty vyrobené elektrické energie ze zadaných elektráren, ale jejich procentní rozložení (převzato z ročních zpráv [11]).

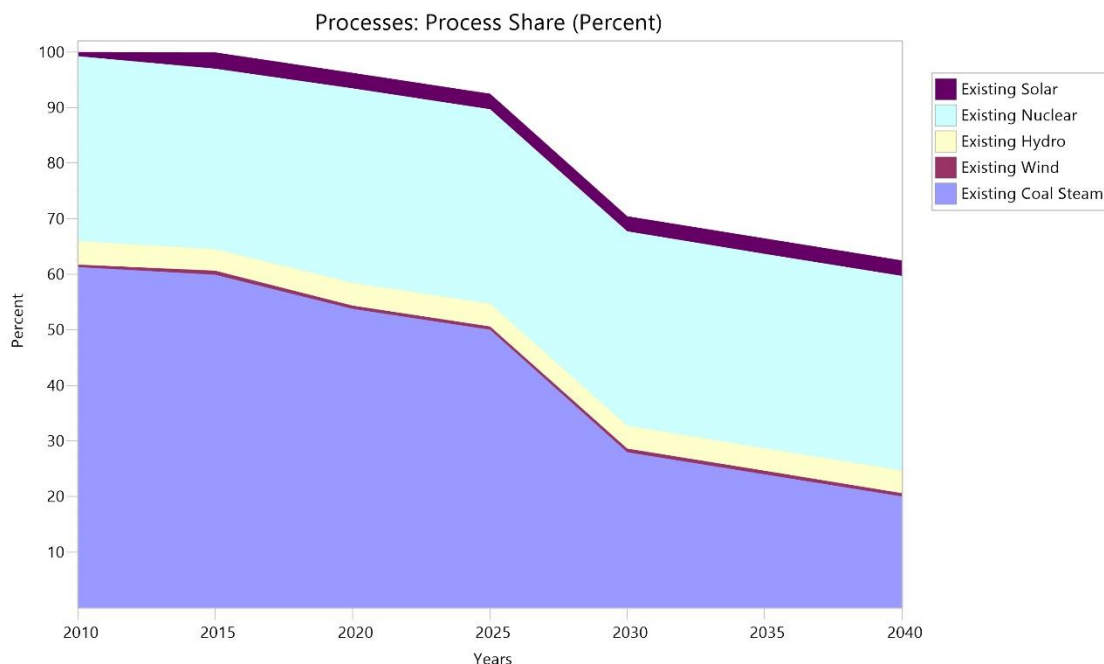
Jako základní scénář se předpokládá snížení uhelných elektráren do roku 2040 na 20 % ze stávajících 63 % (současný výhled pracuje s verzí 11 % - 21 % dle Státní energetické koncepce [14] z uhelných elektráren, ale tento vývoj se může změnit – například při držení tepelných záloh. Žádný nový zdroj elektrické energie nepřidáme a všechny ostatní zdroje zůstávají na nynějších hodnotách. Z toho vyplývá budoucí nedostatek výrobních kapacit na území České republiky a tedy závislost na dovozu ze zahraničí. Možnosti dalšího vývoje popsány níže.

Tab. 5-10: Procentní rozdělení výroby elektrické energie

		2010
Existing Solar	(%)	0,76
Existing Nuclear	(%)	33,27
Existing Hydro	(%)	4,24
Existing Wind	(%)	0,43
Existing Coal Steam	(%)	61,3

Tab. 5-11: Výroba elektrické energie při procentním rozdělení pro základní scénář

		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Existing Coal Steam	(TWh)	48,5	47,3	42,4	32,2	29,5	21,4	15,8
Existing Wind	(TWh)	0,3	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
Existing Hydro	(TWh)	3,4	3,1	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2
Existing Nuclear	(TWh)	26,3	25,7	24,2	25,0	25,8	26,7	27,7
Existing Solar	(TWh)	0,6	2,3	1,9	1,9	2,0	2,1	2,2
Total	(TWh)	79,1	78,9	71,8	62,5	60,8	53,8	49,5



Obr. 5-14: Vývoj výroby při základním scénáři

### 5.2.4 Kategorie Resources

Poslední část nacházející se ve vytvořeném modelu má název *Resources* (zdroje). Je rozdělena na *Primary* a *Secondary*. Zde se nevytváří žádná položka, jelikož se automaticky vloží na základě dříve vytvořených položek ve větvi *Electricity Generation* a zadaných hodnot.

## 5.3 Zadání nového scénáře

V následujících scénářích se zabýváme možnostmi kompenzace nedostatku výrobních kapacit na území České republiky a jejich případnou náhradou na základě energetické koncepce Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky [12].

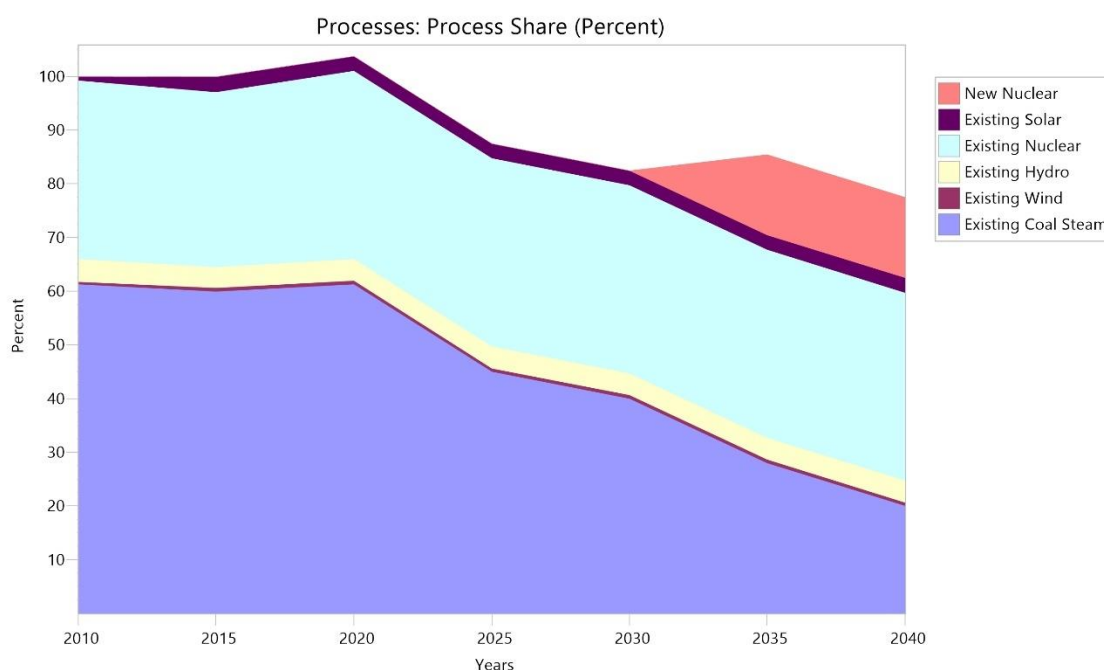
Přidání nového scénáře je na stejném principu jako přidání položek v základních kategoriích stromové struktury. Může se tedy přidat nový scénář u kterého znovu definujeme všechny položky budoucí spotřeby, nebo využít stávajícího základního scénáře, kde budoucí spotřeba elektrické energie v daných sektorech zůstane stejná a měnit se bude pouze výroba. Využijeme druhou možnost a tedy predikce spotřeby energie se nemění. Pro přehlednost změn ve výrobě elektrické energie přidáváme nové položky do větve *Electricity Generation*.

### 5.3.1 Výstavba nového jaderného bloku

Jako první možnost je zvoleno prodloužení životnosti stávajících bloků a navýšení výroby elektrické energie z jaderných elektráren výstavbou nového bloku o výkonu 1000 MW. Přidá se tedy položka *New Nuclear* jejíž procentní zastoupení ve výrobě elektrické energie bude přibližně 15 % při stávající účinnosti. Procentní rozdělení výroby ostatních zdrojů zůstává nezměněno.

Tab. 5-12: Výroba elektrické energie pro první scénář

		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Existing Coal Steam	(TWh)	48,5	47,3	42,4	32,2	29,5	21,4	15,8
Existing Wind	(TWh)	0,3	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
Existing Hydro	(TWh)	3,4	3,1	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2
Existing Nuclear	(TWh)	26,3	25,7	24,2	25,0	25,8	26,7	27,7
Existing Solar	(TWh)	0,6	2,3	1,9	1,9	2,0	2,1	2,2
New Nuclear	(TWh)	-	-	-	-	-	11,5	11,9
Total	(TWh)	79,1	78,9	71,8	62,5	60,8	65,3	61,3



Obr. 5-15: Navýšení výroby z jaderných elektráren

Zde je patrné, že toto opatření nebude stačit na pokrytí celkové spotřeby elektrické energie, pokud se nenavýší výroba z jiného zdroje.

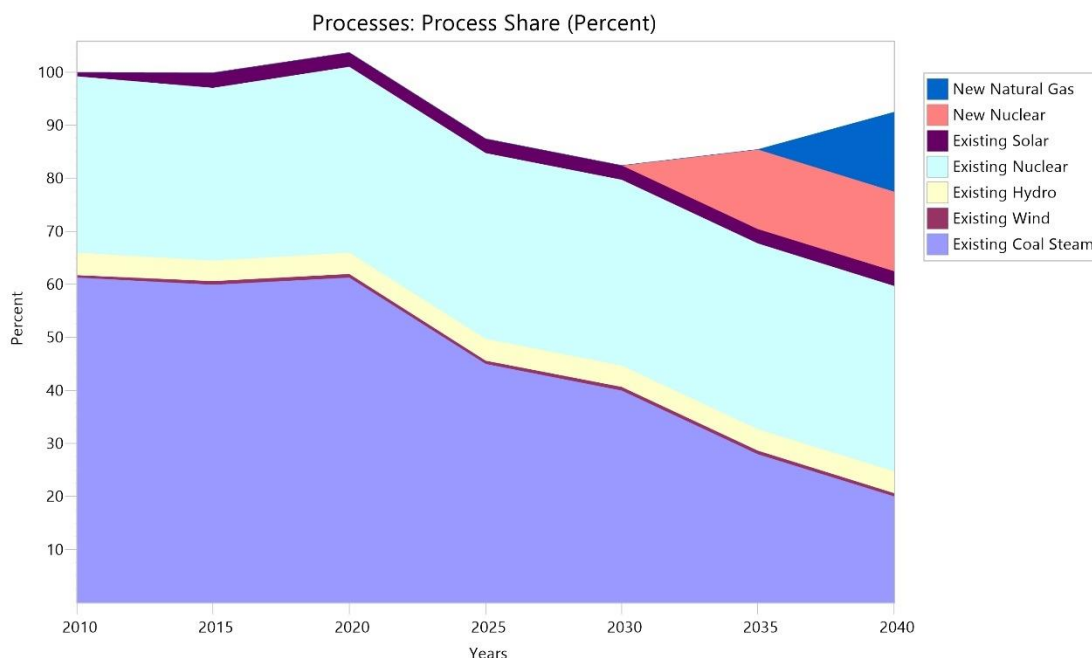
### 5.3.2 Výstavba plynových elektráren

Pro další možnosti navýšení výroby je tedy vytvořen druhý scénář, který také vychází ze základního scénáře. Zde se přidá položka *New Nuclear* jako v předchozí variantě a doplní se to položkou představující plynové elektrárny *New Natural Gas*. Pro určení procentního zastoupení vycházíme z energetické koncepce Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky [12].

Procentní zastoupení ve výrobě elektrické energie bude v roce 2040 představovat 15 %.

Tab. 5-13: Výroba elektrické energie pro druhý scénář

		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Existing Coal Steam	(TWh)	48,5	47,3	42,4	32,2	29,5	21,4	15,8
Existing Wind	(TWh)	0,3	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
Existing Hydro	(TWh)	3,4	3,1	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2
Existing Nuclear	(TWh)	26,3	25,7	24,2	25,0	25,8	26,7	27,7
Existing Solar	(TWh)	0,6	2,3	1,9	1,9	2,0	2,1	2,2
New Nuclear	(TWh)	-	-	-	-	-	11,5	11,9
New Natural Gas	(TWh)	-	-	-	-	-	-	11,9
Total	(TWh)	79,1	78,9	71,8	62,5	60,8	65,3	73,2



Obr. 5-16: Navýšení výroby z jaderných elektráren a přidání plynových zdrojů

V této variantě stále není pokryta předpokládaná tuzemská spotřeba České republiky, i když nárůst výroby elektrické energie se oproti předchozímu scénáři zvýšil.

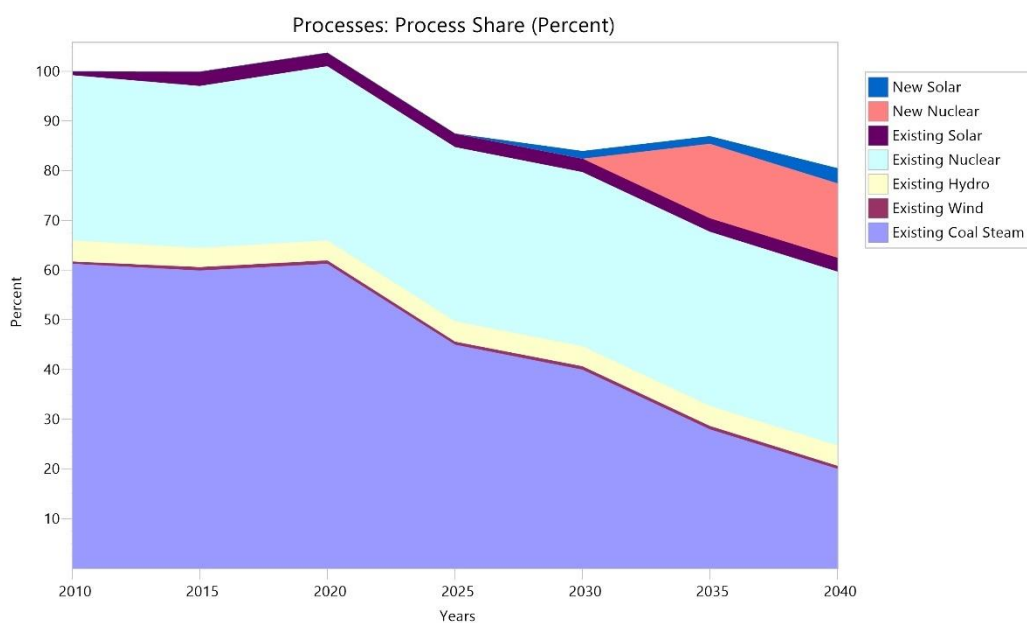
### 5.3.3 Podpora decentralizace výroby

Jako poslední scénář možného navýšení výroby elektrické energie na území České republiky je zvoleno navýšení výroby z jaderných a solárních elektráren. Vychází se zde ze snahy o decentralizovanou výrobu. Předpoklad pro tento scénář je zvýšit instalaci solárních panelů na obytných domech.

Vytvoří se položka *New Nuclear*, jako v předchozích variantách. Její hodnoty se nezmění. U položky *New Solar* se předpokládá procentní zastoupení v celkové výrobě elektrické energie stejné, jako u položky *Existing Solar*.

Tab. 5-14: Výroba elektrické energie pro třetí scénář

		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Existing Coal Steam	(TWh)	48,5	47,3	42,4	32,2	29,9	21,4	15,8
Existing Wind	(TWh)	0,3	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
Existing Hydro	(TWh)	3,4	3,1	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2
Existing Nuclear	(TWh)	26,3	25,7	24,2	25,0	25,8	26,7	27,7
Existing Solar	(TWh)	0,6	2,3	1,9	1,9	2,0	2,1	2,2
New Nuclear	(TWh)	-	-	-	-	-	11,5	11,9
New Solar	(TWh)	-	-	-	-	1,1	1,1	2,4
Total	(TWh)	79,1	78,9	71,8	62,5	61,9	66,4	63,7



Obr. 5-17: Navýšení výroby z jaderných elektráren a solárních elektráren

## 5.4 Zhodnocení

Z tabulky spotřeby elektrické energie pro jednotlivé sektory (Tab. 5-9) vyplývá, že vytvořený model v programu LEAP se ve spotřebě elektrické energie v historických hodnotách téměř neliší od skutečných (převzaté z [10]). Program vyhodnocuje také bilanci elektrické energie pro zvolené modelovací období.

Pro další zhodnocení jednotlivých scénářů modelování do roku 2040 budou použity tabulky o bilanci elektrické energie.

V tabulce (Tab. 5-15) pro rok 2010 jsou zadány historické údaje pro ověření výstupních hodnot z programu LEAP a vyhodnocení správnosti algoritmu modelování. Pro tento případ byly zadány skutečné hodnoty dovozu a vývozu elektrické energie (převzato z [11]).

Tab. 5-15: *Bilance elektrické energie pro rok 2010*

		Electricity
Imports	(TWh)	6,6
Exports	(TWh)	- 21,6
Total Primary Supply	(TWh)	- 15,0
Electricity Generation	(TWh)	79,1
Transmission and Distribution	(TWh)	- 6,4
Total Transformation	(TWh)	72,7
Household	(TWh)	14,7
Transport	(TWh)	1,7
Industry	(TWh)	21,8
Other	(TWh)	19,6
Total Demand	(TWh)	57,7

V tabulce elektrické bilance pro základní scénář, předpokládáme pouze snížení výroby elektrické energie a žádné další navýšení. Vidíme, že simulovaná výroba s omezením uhelných elektráren nedokáže pokrýt spotřebu elektrické energie.

Tab. 5-16: *Bilance elektrické energie pro rok 2040 (základní scénář)*

		Electricity
Imports	(TWh)	29,7
Exports	(TWh)	-
Total Primary Supply	(TWh)	29,7
Electricity Generation	(TWh)	49,5
Transmission and Distribution	(TWh)	- 7,9
Total Transformation	(TWh)	41,5
Household	(TWh)	18,3
Transport	(TWh)	4,3
Industry	(TWh)	25,9
Other	(TWh)	22,8
Total Demand	(TWh)	71,3

U energetických bilancí pro všechny scénáře je patrné, že spotřeba elektrické energie je stejná. Mění se pouze výroba, na základě použité simulace a zároveň s ní se mění i potřeba dovozu elektrické energie. Hodnota vývozu je nulová u všech variant (Tab. 5-16; 5-17; 5-18; 5-19), protože žádná z nich nesplňuje předpoklad vyšší výroby než spotřeby.

Tab. 5-17: Bilance elektrické energie pro rok 2040 (první scénář)

		Electricity
Imports	(TWh)	17,9
Exports	(TWh)	-
Total Primary Supply	(TWh)	17,9
Electricity Generation	(TWh)	61,3
Transmission and Distribution	(TWh)	- 7,9
Total Transformation	(TWh)	53,4
Household	(TWh)	18,3
Transport	(TWh)	4,3
Industry	(TWh)	25,9
Other	(TWh)	22,8
Total Demand	(TWh)	71,3

Tab. 5-18: Bilance elektrické energie pro rok 2040 (druhý scénář)

		Electricity
Imports	(TWh)	6,0
Exports	(TWh)	-
Total Primary Supply	(TWh)	6,0
Electricity Generation	(TWh)	73,2
Transmission and Distribution	(TWh)	- 7,9
Total Transformation	(TWh)	65,3
Household	(TWh)	18,3
Transport	(TWh)	4,3
Industry	(TWh)	25,9
Other	(TWh)	22,8
Total Demand	(TWh)	71,3

Tab. 5-19: Bilance elektrické energie pro rok 2040 (třetí scénář)

		Electricity
Imports	(TWh)	15,5
Exports	(TWh)	-
Total Primary Supply	(TWh)	15,5
Electricity Generation	(TWh)	63,7
Transmission and Distribution	(TWh)	- 7,9
Total Transformation	(TWh)	55,8
Household	(TWh)	18,3
Transport	(TWh)	4,3
Industry	(TWh)	25,9
Other	(TWh)	22,8
Total Demand	(TWh)	71,3

V tabulkách 5-17, 5-18 a 5-19 jde vidět a přehledně porovnat bilance elektrické energie pro všechny tři navrhované scénáře. Je nutné poznamenat, že dané hodnoty dovozu a vývozu

elektrické energie u všech tří scénářů nejsou odpovídající. Na základě historických dat musíme předpokládat, že bude existovat dovoz i vývoz elektrické energie, a to z důvodů např. změny ročních období, povětrnostních vlivů nebo poruchy na technologických zařízeních energetiky.

## 5.5 Ostatní výsledky

Při vytváření energetického modelu České republiky vznikly i sekundární výsledky, které jsou zapříčiněny vytvářením podrobného popisu sektoru. Například ve vytváření struktury domácností (*Household*), je zahrnutá i možnost využití zemního plynu či propan-butanu na vaření. Hlavně je zde řešeno jejich poměrné zastoupení spolu s využíváním elektrické energie. Předpoklad ovšem je, že se bude více využívat elektrických spotřebičů, a proto je model primárně zaměřen na spotřebu a výrobu elektrické energie.

## 6 ZÁVĚR

V úvodu bakalářské práce je provedeno studium modelovacích metod a postupů a jejich rešerše. Bylo provedeno srovnání modelů MARKAL a TIMES, které jsou značně rozšířené. V současné době se model MARKAL již nevyvíjí, ale je stále dostupný. Druhý model TIMES vychází z prvního, ale obsahuje větší variabilitu v zadávání vstupních proměnných i v řešeních.

V programu LEAP, který se stává mezinárodním standardem pro dlouhodobé energetické modelování, byl vytvořen energetický model České republiky. Ten je zaměřen na vývoj spotřeby a výroby elektrické energie do roku 2040. Následně byla namodelována spotřeba a vytvořeny následující scénáře.

Základní scénář – předpokládáme snížení uhelných elektráren do roku 2040 na hodnotu 20 % ze současných 63 %. Nebude přidán ani výrazně navýšen žádný zdroj výroby elektrické energie a předpokládá se závislost České republiky na dovozu ze zahraničí.

První scénář – představuje částečnou kompenzaci nedostatku výroby elektrické energie stavbou nového jaderného bloku o výkonu 1000 MW. Stávající jaderné bloky se neodstaví a jejich živostnost bude prodloužena. Zbývající zdroje elektrické energie budou beze změn.

Druhý scénář – zde už se počítá s výstavbou nového jaderného bloku a o výkonu 1000 MW, který se doplní výrobou elektrické energie z nových plynových elektráren. Jejich procentní zastoupení v celkové výrobě bude u obou představovat 15 %.

Třetí scénář - podporuje decentralizovanou výrobu ze solárních elektráren, které budou umístěny na obytných domech. I zde se počítá s výstavbou nového jaderného bloku.

Pro všechny zmíněné scénáře platí, že spotřeba elektrické energie má do roku 2040 zvyšující tendenci. Jednou z příčin je předpokládaný vysoký nárůst počtu elektromobilů v České republice.

		základní scénář	první scénář	druhý scénář	třetí scénář	
		2010	2040	2040	2040	
Imports	(TWh)	6,6	29,7	17,9	6	15,5
Exports	(TWh)	-21,6	-	-	-	-
Electricity Generation	(TWh)	79,1	49,5	61,3	73,2	63,7
Total Transformation	(TWh)	72,7	41,5	53,4	65,3	55,8
Total Demand	(TWh)	57,7	71,3	71,3	71,3	71,3

V roce 2010 jsou zahrnuty i údaje o dovozu a vývozu elektrické energie. Pro všechny scénáře platí, že algoritmus modelování nepředpokládá vývoz elektrické energie, ale pouze její dovoz. To je způsobeno nedostatkem výrobních kapacit a potřebou pokrytí celkové spotřeby elektrické energie v České republice. Zvolený algoritmus, podle kterého model pracoval nebyl optimální.

Vzhledem k vysoké variabilitě programu a možnostem jeho využití, je žádoucí vytvoření dalších modelů k podrobné analýze.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ETSAP. *MARKAL* [online]. In: ., [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/markal>
- [2] LOULOU, Richard, Gary GOLDSTEIN a Ken NOBLE. *Documentation for the MARKAL Family of Models* [online]. 2004 [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: [https://iea-etsap.org/MrklDoc-I\\_StdMARKAL.pdf](https://iea-etsap.org/MrklDoc-I_StdMARKAL.pdf)
- [3] ETSAP. *TIMES* [online]. In: ., [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times>
- [4] LOULOU, Richard. *Documentation for the TIMES Model: PART I* [online]. 2016 [cit. 2019-01-19]. Dostupné z: [https://iea-etsap.org/docs/Documentation\\_for\\_the\\_TIMES\\_Model-Part-I\\_July-2016.pdf](https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf)
- [5] MAHMUD, Khizir a Graham E. TOWN. A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks. *Applied Energy* [online]. 2016, , 337-359 [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916304275?via%3Dihub>
- [6] ETSAP. *A comparison of the TIMES and MARKAL models* [online]. In: . 2009, s. 4 [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: <https://iea-etsap.org/tools/TIMESVsMARKAL.pdf>
- [7] Eurostat. *METIS* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-modelling/metis>
- [8] Heaps, C.G., 2016. *Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system*. [Software version: 2019.1.25] Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA.
- [9] Energy community. *LEAP* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.energycommunity.org/default.asp?action=introduction>
- [10] Eurostat [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- [11] Energetický regulační úřad [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/elektrina>
- [12] *Zpráva o očekávané dlouhodobé rovnováze mezi nabídkou a poptávkou elektřiny a plynu* [online]. 2016 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/2017/8/Zprava-o-ocekavane-dlouhodobem-rovnovaze-mez-nabidkou-elektriny-a-plynu-2016\\_.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/2017/8/Zprava-o-ocekavane-dlouhodobem-rovnovaze-mez-nabidkou-elektriny-a-plynu-2016_.pdf)
- [13] Ministerstvo dopravy. *Ročenka dopravy České republiky* [online]. 2017, , 174 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [https://www.sydos.cz/cs/rocenka\\_pdf/Rocenka\\_dopravy\\_2017.pdf](https://www.sydos.cz/cs/rocenka_pdf/Rocenka_dopravy_2017.pdf)
- [14] *Státní energetická koncepce* [online]. 2015 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument158059.html>
- [15] *Open Energy Modelling Initiative* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.openmod-initiative.org/manifesto.html>