



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA PODNIKATELSKÁ

FACULTY OF BUSINESS AND MANAGEMENT

## ÚSTAV INFORMATIKY

INSTITUTE OF INFORMATICS

# VYUŽITÍ METOD SOFT COMPUTINGU JAKO PODPORY PRO ROZHODOVÁNÍ PŘI ŘÍZENÍ PODNIKU

THE USE OF SOFT COMPUTING AS SUPPORT FOR BUSINESS DECISION-MAKING

## DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jan Pekárek

## ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Dostál, CSc.

BRNO 2018

## Zadání dizertační práce

Ústav: Ústav informatiky  
Student: **Ing. Jan Pekárek**  
Studijní program: Ekonomika a management  
Studijní obor: Řízení a ekonomika podniku  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Petr Dostál, CSc.**  
Akademický rok: 2018/19

### Využití metod soft computingu jako podpory pro rozhodování při řízení podniku

#### Charakteristika problematiky úkolu:

- Úvod
- Rešerše literatury
- Cíle a přínosy disertační práce
- Metodologie a struktura práce
- Technické detaily práce
- Model poptávky po nabíjecí službě
- Model nabídky nabíjecí služby
- Simulátor nabíjení
- Optimalizační model
- Optimalizační metody
- Výsledky
- Ekonomické aspekty optimalizace
- Závěr
- Bibliografie

#### Cíle, kterých má být dosaženo:

Hlavní cíl práce

Cílem disertační práce je tvorba dynamického rozšiřitelného optimalizačního modelu -problému rozmístění nabíjecí infrastruktury pro elektromobily, navržení metody jeho řešení a demonstrace modelu na případě ČR.

Dílčí cíle práce

- Analýza prostředí elektromobility ve světě a v ČR.
- Nalezení vhodného metodologického rámce a jeho nástrojů.
- Stanovení základních proměnných, nalezení požadovaných datových zdrojů, jejich čerpání a zpracování.

- Návrh celkové architektury modelu a dílčích částí, stanovení požadavků na data k jednotlivým částem.
- Návrh metody řešení modelu, měření výkonnosti metody a její optimalizace.
- Demontrace funkčnosti modelu na reálných datech.
- Poskytnutí dostatečně obsáhlé strukturované diskuze ke každému z analyzovaných podproblémů.

#### Základní literární prameny:

DOSTÁL, Petr. Soft computing v podnikatelství a veřejné správě. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015, 2 sv. : il., mapy, grafy. ISBN 978-80-7204-896-0.

DOSTÁL, P. Advanced Decision Making in Business and Public Services. Brno: CERM Academic Publishing House, 2013. 168 p. ISBN: 978-80-7204-747-5.

MOLNÁR, Zdeněk. Pokročilé metody vědecké práce. 1. vyd. Zeleněč: Profess Consulting, 2012. Věda pro praxi (Profess Consulting). ISBN 9788072590643.

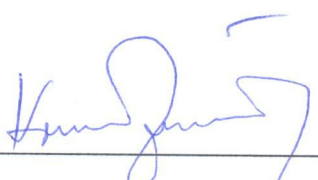
CORMEN, Thomas. Introduction to algorithms. 3rd ed. Cambridge: MIT Press, 2009, xix, 1292 s. ISBN 978-0-262-03384-8.

HILLIER, Frederick a Gerald LIEBERMAN. Introduction to operations research. Tenth edition. New York, NY: McGraw-Hill, 2015. ISBN 978-0073523453.

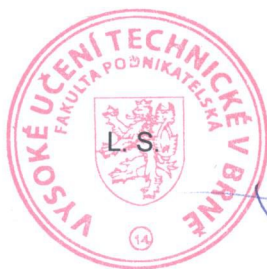
JANÍČEK, Přemysl. Systémová metodologie: brána do řešení problémů. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014, 1 sv. (různé stránkování) : il. ISBN 978-80-7204-887-8.

Termín odevzdání dizertační práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 23. 6. 2016



prof. Ing. Vojtěch Koráb, Dr., MBA  
předseda oborové rady




doc. Ing. et Ing. Stanislav Škapa, Ph.D.  
děkan

## **Abstrakt**

Předložená disertační práce se zabývá problémem rozmístění nabíjecí infrastruktury pro elektromobily na území České republiky. Nejprve je vymezeno téma, vysvětlena motivace k jeho řešení a je definován problém. Následně jsou poskytnuty literární zdroje různé povahy, aby poskytly široký, ucelený pohled na zkoumanou problematiku. Jsou definovány cíle práce a je poskytnuto vysvětlení k metodologii. Následně je představena architektura jádra práce, aby bylo možné přejít k výkladu dílčích částí. Jádrem práce je matematický optimalizační model, případně jej můžeme chápat jako optimalizační simulaci, který je implementován v jazyce výpočetního software MATLAB. Model je tvořen několika dílčími celky představující samostatné modely zkoumaných veličin. Jednotlivé kapitoly práce postupně popisují tyto dílčí modely. Úvodem je pojednáno o použitých datových zdrojích, následuje popis modelu poptávky po nabíjecí službě. Jelikož jde o model velmi zásadně ovlivňující výsledek, je k němu poskytnuta podrobná kritika navrženého řešení včetně zkoumání potenciálních slabých míst tohoto modelu. Následuje model nabídky nabíjecí služby vycházející z veřejné databáze existujících nabíjecích stanic. Tyto dva modely spolu interagují v simulátoru nabíjení – modelu průběhu nabíjecích událostí. Ten je jádrem optimalizačního modelu z následující kapitoly, resp. jádrem ústřední účelové funkce. Optimalizační model je nejprve zkoumán z hlediska výpočetní složitosti a než je přistoupeno k jeho řešení, jsou navrženy a implementovány změny, které mnohonásobně zrychlují výpočet modelu. V další kapitole je pak představena vlastní metoda řešení optimalizačního modelu založená na principu heuristické genetické reprodukce populací možných řešení. Je navržen formát populace, kde genetickou informaci nesou jak uložené hodnoty, tak samotná její struktura. Celá optimalizační metoda je prezentována jako optimalizační solver, do kterého vstupuje vedle účelové funkce ještě série řídicích parametrů. Optimalizační solver je implementován ve dvou provedeních, jako základní model pracující s jedním obdobím a jako sofistikovanější model umožňující optimalizovat několik po sobě jdoucích rozmístovacích fází. Použití obou typů solverů je demonstrováno na numerickém příkladu používajícím aktuální reálná data. Závěrečná kapitola pojednává o ekonomických aspektech zkoumaného problému, o důsledcích zjištění a o roli, kterou optimalizační model v uvažovaném kontextu hraje. Hlavní přínos práce neleží v poskytnutých numerických výsledcích, jelikož ty každým momentem zastarávají. Hodnota práce spočívá ve formulaci zkoumaného problému do podoby matematického modelu, doprovodných analýzách a zdůvodněních. Libovolný uživatel disponující aktuálními reálnými daty pak může tuto práci spolu s příloženými skripty použít a pomocí nich nalézt odpovědi na otázky týkající se vztahu elektromobility a nabíjecí infrastruktury.

## **Klíčová slova**

rozmístění nabíjecí infrastruktury, model nabíjecí infrastruktury, optimalizační model, nabíjení elektromobilů, elektromobilita, Česká republika, ekonomie.



## **Abstract**

The presented dissertation deals with the problem of deploying the charging infrastructure for electric vehicles in the Czech Republic. First, the topic is defined and the motivation is explained. Subsequently, literary sources of a different nature are examined to provide a broad, comprehensive view of the subject. The aims of the work are defined and an explanation of the methodology is provided. Consequently, the architecture of the core of the work is presented, so that it is possible to move on to the explanation of the parts. The core of the thesis is a mathematical optimization model, or we can interpret it as an optimization simulation, which is implemented in the language of MATLAB computing software. The model consists of several sub-units representing separate models of studied sub-problems. The individual chapters of the work describe successively these sub-models. In the beginning we discuss the used data sources, followed by a description of the demand model for the charging service. Because the model is quite critical, a detailed critique of the proposed solution is provided exploring the potential weaknesses of the model. Next chapter describes model of the charging service based on the public database of existing charging stations. These two models mutually interact in the charging simulator, which models the charging events. This constitutes the core of the optimization model from the chapter 9 or its central objective function, respectively. The optimization model is first examined in terms of computational complexity, and before we attempt to solve it, changes are designed and implemented to multiply its calculation speed. The next chapter presents custom optimization method based on the principle of heuristic genetic reproduction of the populations of possible solutions. A population format is proposed, where genetic information is carried by both the stored values and the structure. The optimization method is presented as an optimization solver with possibility to set control parameters and input the objective function. The optimization solver is implemented in two versions, as a basic solver capable of calculating one period ahead and as a more sophisticated multi-period solution solver to optimize several consecutive deployment phases. The use of both types of solvers is demonstrated on a numerical example using realistic current data. The final chapter deals with an economic aspect of the problem under consideration, the implications of the findings and the role that the optimization model plays in the context under consideration. The main benefit of the work is not in the provided numerical results, as they obsolete very quickly. The true value of the work lies in the formulation of the problem as a mathematical model, the accompanying analyzes and the provided justifications. Any user with updated data can then use this work along with the attached scripts to find answers to questions about the relationship between electromobility and the charging infrastructure.

## **Keywords**

charging infrastructure placement, charging infrastructure model, optimization model, electric vehicles charging, electromobility, Czech Republic, economics.

## **Bibliografická citace**

PEKÁREK, J. *Využití metod soft computingu jako podpory pro rozhodování při řízení podniku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, 2019, 247 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Petr Dostál, CSc.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že předložená disertační práce s názvem Optimalizace nabíjecí infrastruktury pro elektromobily je původní a zpracoval jsem ji samostatně pod vedením mého školitele. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná a že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně, dne 1.6.2018

.....

Ing. Jan Pekárek

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli prof. Ing. Petru Dostálovi, CSc. za cenné rady během celého studia a za připomínky k disertační práci. Dále bych rád poděkoval Ing. Davidu Schüllerovi, Ph.D. za inspiraci, dlouhodobou spolupráci a za jeho vzácný elán k vědeckému bádání. Rovněž bych rád poděkoval Ing. Bogdanu Kaletovi z Národního dopravního informačního centra, bez jehož vstřícnosti k poskytnutí datových podkladů by nebylo práci možné dokončit. V neposlední řadě bych rád poděkoval Ing. Janě Mokré za její zájem, podporu a vítané rozptylování.

# Obsah

<b>ABSTRAKT</b>	<b>2</b>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>3</b>
<b>KEYWORDS</b>	<b>3</b>
<b>BIBLIOGRAFICKÁ CITACE</b>	<b>4</b>
<b>ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ</b>	<b>5</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ</b>	<b>6</b>
<b>OBSAH</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>12</b>
<b>1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ</b>	<b>13</b>
<b>2 REŠERŠE LITERATURY</b>	<b>14</b>
<b>2.1 STAV A BUDOUCNOST ELEKTROMOBILITY VE SVĚTĚ</b>	<b>14</b>
2.1.1 SEVERNÍ AMERIKA	14
2.1.2 EVROPA	15
2.1.3 ASIE A ZBYTEK SVĚTA	16
2.1.4 STATISTIKY A PREDIKCE	17
<b>2.2 STAV A BUDOUCNOST ELEKTROMOBILITY V ČR</b>	<b>18</b>
<b>2.3 AKTUÁLNÍ DĚNÍ VE SVĚTĚ ELEKTROMOBILITY</b>	<b>19</b>
<b>2.4 ZÁKLADNÍ ODBORNÁ LITERATURA</b>	<b>24</b>
<b>2.5 MATEMATICKÉ MODELÝ CSPP</b>	<b>32</b>
<b>2.6 MODELÝ ODHADŮ POPTÁVKY PO NABÍJECÍ SLUŽBĚ</b>	<b>37</b>
<b>2.7 EKONOMICKÉ MODELÝ</b>	<b>40</b>
<b>2.8 METODY ŘEŠENÍ MODELŮ CSPP</b>	<b>42</b>
<b>3 CÍLE A PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>47</b>

<b>3.1</b>	<b>CÍLE</b>	<b>47</b>
<b>3.2</b>	<b>PŘÍNOSY</b>	<b>47</b>
3.2.1	VĚDECKÝ	47
3.2.2	EKONOMICKÝ	47
3.2.3	PEDAGOGICKÝ	48
<b>4</b>	<b>METODOLOGIE A STRUKTURA PRÁCE</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>OBEZNĚ O METODÁCH VĚDECKÉ PRÁCE</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>ŠIRŠÍ KONTEXT A POUŽITÍ OPTIMALIZAČNÍHO MODELU</b>	<b>53</b>
<b>4.3</b>	<b>OBSAHOVÉ JÁDRO PRÁCE – OPTIMALIZAČNÍ PROBLÉM</b>	<b>54</b>
<b>4.4</b>	<b>PŘEDSTAVENÍ MODELU</b>	<b>56</b>
4.4.1	TŘI ZDROJE INSPIRACE	56
4.4.2	DVĚ STRANY MODELU	57
4.4.3	SERVICE AREA	58
<b>4.5</b>	<b>ARCHITEKTURA MODELU</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>TECHNICKÉ DETAILS PRÁCE</b>	<b>63</b>
<b>5.1</b>	<b>ŘSD DATA SILNICE</b>	<b>63</b>
<b>5.2</b>	<b>ŘSD DATA DOPRAVA 2011</b>	<b>63</b>
<b>5.3</b>	<b>ŘSD DATA DOPRAVA 2016</b>	<b>64</b>
<b>5.4</b>	<b>OPEN CHARGE MAP DATA</b>	<b>65</b>
<b>5.5</b>	<b>DATA O POČTECH ELEKTROMOBILŮ V ČR</b>	<b>65</b>
<b>5.6</b>	<b>SOUŘADNICOVÉ SYSTÉMY</b>	<b>65</b>
5.6.1	S-JTSK	65
5.6.2	WGS-84	65
<b>5.7</b>	<b>GEODETICKÁ VZDÁLENOST</b>	<b>66</b>
<b>5.8</b>	<b>ZDROJE INFORMACÍ O TECHNOLOGIÍCH NABÍJECÍ INFRASTRUKTURY</b>	<b>66</b>
<b>5.9</b>	<b>PARAMETRY PC</b>	<b>67</b>
<b>5.10</b>	<b>POPISY OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ; ODBORNÉ TERMÍNY, NÁZVY FUNKCÍ</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>MODEL POPTÁVKY PO NABÍJECÍ SLUŽBĚ</b>	<b>69</b>
<b>6.1</b>	<b>GENEZE MODELU POPTÁVKY A ZAVRŽENÉ VERZE</b>	<b>69</b>
6.1.1	PŮVODNĚ NAVRŽENÝ MODEL	70
6.1.2	VÝPOČETNÍ A PAMĚŤOVÁ NÁROČNOST	73
<b>6.2</b>	<b>PŘEPOČET METRIK</b>	<b>74</b>
6.2.1	ODVOZENÍ TRANSFORMACE	75
6.2.2	VÝPOČET PARAMETRŮ TRANSFORMACE	78
<b>6.3</b>	<b>REVIDOVANÝ MODEL POPTÁVKY</b>	<b>82</b>



6.3.1	PROSTOROVÝ MODEL POPTÁVKY	83
6.3.2	ČASOVÝ MODEL POPTÁVKY	86
<b>6.4</b>	<b>KRITIKA MODELU POPTÁVKY</b>	<b>98</b>
6.4.1	CHOVÁNÍ ŘIDIČŮ PEV A ICEV	99
6.4.2	CESTOVNÍ A NABÍJECÍ CHOVÁNÍ	99
6.4.3	DATA INTENZITY DOPRAVY	100
6.4.4	ŘIDIČI V ČESKU A V ZAHRANIČÍ	101
6.4.5	SHRnutí KRITIKY	102
<b>7</b>	<b>MODEL NABÍDKY NABÍJECÍ SLUŽBY</b>	<b>103</b>
<b>7.1</b>	<b>VÝCHOZÍ ZDROJE LITERATURY A DAT</b>	<b>103</b>
<b>7.2</b>	<b>OPEN CHARGE MAP DATABÁZE</b>	<b>103</b>
<b>7.3</b>	<b>FAKTORY</b>	<b>104</b>
7.3.1	PROSTOROVÁ DIMENZE	105
7.3.2	ČASOVÁ DIMENZE (EXPANZIVNÍ + OBSLUŽNÝ POHLED)	107
7.3.3	DOSTUPNOST STANICE	111
7.3.4	KOMPATIBILITA VOZIDLA A KONEKTORU	111
7.3.5	NEOPTIMÁLNÍ POUŽÍVÁNÍ VOZIDLA	113
<b>7.4</b>	<b>MODEL NABÍDKY</b>	<b>115</b>
7.4.1	STAŽENÍ, TRANSFORMACE A FILTRACE DAT	115
7.4.2	DOPLNĚNÍ DAT A TECHNICKÉ PARAMETRY STANIC	116
7.4.3	GRAFICKÁ REPREZENTACE	117
<b>8</b>	<b>SIMULÁTOR NABÍJENÍ</b>	<b>119</b>
<b>8.1</b>	<b>TECHNICKÉ PARAMETRY NABÍJECÍCH STANIC</b>	<b>119</b>
<b>8.2</b>	<b>GENERÁTOR PŘÍJEZDŮ</b>	<b>119</b>
<b>8.3</b>	<b>GENERÁTOR POŽADOVANÉ KAPACITY NABÍJENÍ</b>	<b>122</b>
<b>8.4</b>	<b>GENERÁTOR POBYTU</b>	<b>126</b>
<b>8.5</b>	<b>MODEL INTERAKCE VOZIDEL A STANIC</b>	<b>129</b>
8.5.1	VOLÁNÍ A PŘÍPRAVA VSTUPNÍCH DAT	130
8.5.2	SIMULÁTOR NABÍJECÍCH UDÁLOSTÍ	132
8.5.3	STATISTIKY SIMULACE	134
<b>9</b>	<b>OPTIMALIZAČNÍ MODEL</b>	<b>136</b>
<b>9.1</b>	<b>KRITÉRIA OPTIMALIZACE</b>	<b>136</b>
9.1.1	KRITÉRIUM SPOJITOSTI SA A POKRYTÍ ČR	136
9.1.2	KRITÉRIUM VYTÍŽENOSTI STANIC	137
9.1.3	KRITÉRIUM EKONOMICKÉ NÁVRATNOSTI INVESTICE	139

9.1.4	KRITÉRIUM VYTÍŽENOSTI PŘENOSOVÉ SÍŤE	141
9.1.5	VÝBĚR KRITÉRIA OPTIMALIZACE	141
<b>9.2</b>	<b>MOTIVACE K FORMÁTU OPTIMALIZAČNÍHO MODELU</b>	<b>144</b>
<b>9.3</b>	<b>ČASOVÉ ROZLIŠENÍ DATOVÝCH SOUBORŮ A OPTIMALIZAČNÍCH FÁZÍ</b>	<b>144</b>
<b>9.4</b>	<b>ÚČELOVÁ FUNKCE</b>	<b>146</b>
9.4.1	DÍLČÍ KRITÉRIA	147
9.4.2	AGREGACE, NORMALIZACE A PRIORITYZACE DÍLČÍCH KRITÉRIÍ	148
9.4.3	DETERMINISMUS ÚČELOVÉ FUNKCE	151
<b>9.5</b>	<b>PŘEDOPTIMALIZAČNÍ ANALÝZA VÝPOČETNÍ NÁROČNOSTI</b>	<b>151</b>
9.5.1	PARALELIZACE NA CPU	155
9.5.2	PARALELIZACE NA GPU	158
<b>10</b>	<b><u>OPTIMALIZAČNÍ METODY</u></b>	<b>161</b>
<b>10.1</b>	<b>NÁHODNÉ PROHLEDÁVÁNÍ</b>	<b>161</b>
<b>10.2</b>	<b>GENETICKÝ ALGORITMUS</b>	<b>161</b>
10.2.1	ŘÍDÍCÍ PARAMETRY A PŘEDSTAVENÍ POPULACE	162
10.2.2	GENERÁTOR POPULACE	167
10.2.3	REPRODUKČNÍ PROCES	169
10.2.4	PŘEKLAD GENOTYPU NA FENOTYP	177
10.2.5	OBOHACENÍ O MNOŽINU EXISTUJÍCÍCH STANIC	178
10.2.6	KRITÉRIA ZASTAVENÍ	178
10.2.7	CGA PRO VÍCE OBDOBÍ	179
<b>10.3</b>	<b>MOŽNÉ ROZŠÍŘENÍ OPTIMALIZAČNÍHO MODELU</b>	<b>179</b>
10.3.1	OPTIMALIZACE ROZMISŤOVACÍ SEKVENCE	179
10.3.2	OPTIMALIZACE OPTIMALIZAČNÍ METODY	180
<b>11</b>	<b><u>VÝSLEDKY</u></b>	<b>182</b>
<b>11.1</b>	<b>CGA JEDNO OBDOBÍ</b>	<b>182</b>
<b>11.2</b>	<b>CGA VÍCE OBDOBÍ</b>	<b>183</b>
<b>12</b>	<b><u>EKONOMICKÉ ASPEKTY OPTIMÁLNÍHO ROZMÍSTĚNÍ STANIC</u></b>	<b>190</b>
<b>12.1</b>	<b>ČASOVÝ ASPEKT BUSINESS PLÁNŮ</b>	<b>190</b>
<b>12.2</b>	<b>PŘÍLIŠ MÁLO ZKUŠENOSTÍ</b>	<b>191</b>
<b>12.3</b>	<b>PRVNÍ EMPIRICKÉ DŮKAZY</b>	<b>193</b>
<b>12.4</b>	<b>SHRnutí EKONOMICKÉHO POHLEDU</b>	<b>197</b>
<b>ZÁVĚR</b>		<b>199</b>

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK</b>	<b>200</b>
<b>BIBLIOGRAFIE</b>	<b>203</b>
<b>ODBORNÝ ŽIVOTOPIS</b>	<b>230</b>
<b>SEZNAM VYDANÝCH PUBLIKACÍ</b>	<b>231</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>233</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>235</b>
<b>PŘÍLOHY</b>	<b>236</b>
<b>PŘÍLOHA 1: SPECIFIKA MATICOVÉ REPREZENTACE GRAFU</b>	<b>236</b>
NĚKTERÉ OBECNÉ VLASTNOSTI <b><i>G</i></b>	236
DATA A MATICOVÁ INTERPRETACE <b><i>G</i></b>	237
<b>PŘÍLOHA 2: ATRIBUT DOJEZDOVÉ VZDÁLENOSTI</b>	<b>240</b>
<b>PŘÍLOHA 3: SEZNAM FUNKCÍ MODELU</b>	<b>241</b>
<b>PŘÍLOHA 4: PŘÍKLADY FUNKCÍ MODELU</b>	<b>243</b>
FUNKCE MAINOBJECTIVEFUNCTION . M	243
FUNKCE GANORMALSELECTION . M	244
FUNKCE DISTDIMINISH . M	245
<b>PŘÍLOHA 5: UKÁZKA VZORKU VSTUPNÍCH DAT (ŘSD PRŮZKUM DOPRAVY 2010)</b>	<b>247</b>

## Úvod

Jestliže se současné trendy nezvrátí, potom 10. léta 21. století si bude historie pamatovat jako dobu, kdy se nastartoval zájem vyspělého světa o více než 100 let starou myšlenku – osobní silniční vozidlo s elektrickým pohonem, zkráceně elektromobil.

Disertační práce se zabývá tématem z oblasti elektromobility, konkrétně problémem optimálního rozmístění nabíjecích stanic pro elektromobily. Nedostatečná nabíjecí infrastruktura je totiž mezi odbornou veřejností identifikována jako jedna z hlavních překážek rozvoje elektromobility.

Elektromobilita je téma doprovázené silnými emocemi. Její zastánci o ní hovoří jako o všehoschopném, samospasném prostředku k dosažení společnosti budoucnosti. Její odpůrci v ní vidí přechodný technologický výstřelek a pouhý způsob, jak plýtvat vzácnými ekonomickými a často veřejnými zdroji.

Cílem této práce není přiklonit se na jednu či druhou názorovou stranu. Práce se snaží argumenty pro i proti elektromobilitě vnímat a využít je jako dodatečné zdroje informací při tvorbě matematického modelu deklarovaného problému. Argumenty obou stran totiž budou mít jistě smysluplný základ, pouze je často obtížné oprostít se od zvolené, úzké názorové ideologie a vnímat celé téma objektivněji optikou empirických faktů.

Smyslem práce je vytvořit nástroj, který svým uživatelům umožní systematicky dekomponovat stanovený problém, definovat na něm důležité proměnné, pro tyto proměnné si zajistit vstupy a na nich postavit matematický model, který je všechny kombinuje. Z tohoto hlediska nejde pouze o numerický výsledek modelu. Ten je pouze demonstrací jeho funkčnosti, případně jakýmsi informačním bonusem. Skutečnou hodnotu v modelu představuje provázání vzájemných vztahů do jediného celku včetně odůvodnění, proč je autor navrhl právě takto.

Autor si je vědom komplexnosti tématu elektromobility. V celé práci se proto snaží zkoumané téma definovat co nejpřesněji a zároveň neodbíhat z vymezených hranic. Pakliže je cílem práce vytvoření matematického optimalizačního modelu a metody jeho řešení, pak se veškerá doprovodná argumentace týká (nebo alespoň by se měla týkat) této centrální myšlenky. Široká paleta citovaných zdrojů je pouze způsobem, jak stále stejný problém vnímat různými pohledy. Autor nechává čtenáři na posouzení, zda se tento záměr podařil.

# 1 Vymezení základních pojmů

Pro snazší pochopení problematiky elektromobility a volby alternativních typů paliva obecně je vhodné úvodem poskytnout stručné vymezení některých pojmů. V odborné literatuře i v žurnalistice bývá někdy obtížné správně zařadit a pojmenovat jednotlivé typy osobních vozidel. Tab. 1 poskytuje stručný přehled základního dělení vozidel a jejich značení. Význam zkratk lze nalézt v seznamu zkratk na konci práce.

Tab. 1: Rozdělení typů osobních vozidel podle zdroje a zpracování energie

		typ pohonu			
		jen elektrický motor	jen spalovací motor	kombinace + vnitřní zdroj	kombinace + externí zdroj
typ paliva	ropa	-	ICEV	HEV	PHEV
	zemní plyn	-	NGV		
	elektrická energie	PEV, BEV	-		
	vodík	FCV (FCEV)	HICEV	-	-

(Zdroj: vlastní zpracování, z kolekce citovaných zdrojů)

Vedle těchto základních, dalo by se říct atomických kategorií vozidel existují ještě některé kategorie vyšší úrovně. Někteří autoři používají zkratku NEV, kterou charakterizují veškerá typy vozidel uvedené v tabulce kromě ICEV a HEV [1]. HEV a PHEV používají oba typy pohonu, rozdíl je ovšem ve způsobu doplňování paliva. HEV používají elektromotor, potažmo baterie k rekuperaci energie a k vyrovnávání výkyvů výkonu spalovacího motoru. Elektromotor není primární pohonnou jednotkou a bateriový článek není doplňován elektřinou z externího zdroje. Na druhé straně PHEV umožňují dobítí baterie z externího zdroje, přičemž ostatními vlastnostmi HEV disponují rovněž. Není proto divu, že pokud je řeč o „hybridech“, pak se zpravidla má na mysli PHEV, jelikož jsou kvůli svým výhodám rozšířenější než HEV. Práce se primárně zaměřuje na „pravé elektromobily“, tedy skupinu vozidel označenou PEV (případně BEV), která je poháněna výhradně elektromotorem a využívá externí zdroj elektrické energie. Uvedené dělení není vyčerpávající, jeho cílem je pouze poskytnout základní představu o typech osobních vozidel, potažmo elektromobilů a v literatuře běžně používaných zkratkách.

Práce pojednává o problému rozmístění nabíjecích stanic pro elektromobily: Charging Station Placement Problem (CSPP). Problém je zasazen do prostředí České republiky. K řešení problému využívá optimalizační model (simulaci), jehož řešení získává aplikací speciální implementace genetického algoritmu nazvanou CGA. Práce se snaží odpovědět na otázku: „Kam postavit zdroje externího nabíjení pro plug-in elektromobily, aby jejich umístění bylo optimální z pohledu definovaných ukazatelů?“

## 2 Rešerše literatury

Náplní této kapitoly je zevrubné představení elektromobility, zejména pak bude pojednáno o otázkách modelování problémů vztahujících se k nabíjecí infrastruktuře, k chování uživatelů elektromobilů a k modelování ekonomického pojetí elektromobility. Vzhledem k tématu práce budou diskutovány především optimalizační modely se zaměřením na nabíjecí infrastrukturu, ve kterých bylo využito některých z metod soft computingu.

Kapitola 2: Rešerše literatury definuje a vymezuje problém a argumentuje, proč se jedná o problém, viz [2]. Čtenáře poprvé seznamuje s problémem a definuje, co se bude řešit a proč. Toto je shrnuto v kapitole 3 o cílech práce. Naopak kapitola 4 o metodologii definuje, jak se bude deklarovaný problém řešit, a proč je vybrán právě tento způsob řešení.

### 2.1 Stav a budoucnost elektromobility ve světě

V následující podkapitole bude stručně představen stav globálního trhu s elektromobily a jeho očekávaný vývoj. Zmíněna budou především ryze ekonomická data typu prodaných kusů a velikosti trhů. Částečně budou komentovány sociálně-kulturní aspekty adopce elektromobilů, jako jsou módní trendy, vztah k životnímu prostředí nebo sociálně-ekonomický profil obyvatelstva. Záměrně bude vynechán popis legislativního prostředí, především postoj vlád k elektromobilitě a s ním spojených ekonomicko-právních úprav ve formě restriktivních či subvenčních opatření. Legislativní aspekty budou představeny až v kapitole z prostředí ČR. Tento přístup byl zvolen proto, že analýza globálního postoje k elektromobilitě z hlediska legislativy není primárním cílem této práce a rozsah takové analýzy by významně přesáhl zamýšlený rozsah kapitoly.

#### 2.1.1 Severní Amerika

Za kolébku elektromobility lze považovat Spojené státy americké, především jejich západní pobřeží [3] [4]. Důvody této skutečnosti lze hledat v mnoha aspektech. V oblasti kolem západního pobřeží, konkrétně státu Kalifornie, žije bohatá, vzdělaná společnost, která nejméně od druhé poloviny 20. století postupně přesouvá těžiště svého zájmu od ryze materiálních záležitostí k tématům domněle morálně hodnotnějším, jako je například téma životního prostředí. V oblasti, která se vyznačuje teplým a klidným podnebím a kde lze nalézt největší technologický inkubátor světa v Silicon Valley, se daří lidem se zájmem o životní prostředí a technologickým nadšencům. Slunečné podnebí podporuje využitelnost obnovitelných zdrojů energie, například solární, kterou lze použít k napájení nejrůznějších technologických výstřelků, včetně elektromobilů. Není proto divu, že právě tato oblast má na svědomí technologicko-environmentální entuziasmus spojený s technologií elektromobilů, který se dnes šíří do celého světa.

Podle aktuálních studií byl trh elektromobilů ve Spojených státech největším na světě do roku 2014 a pravděpodobně dále do poloviny roku 2015 [5]. V roce 2015 však došlo k mírnému poklesu prodeje oproti roku 2014 v řádu jednotek procent. Trh v USA si toto



prvenství udržoval prakticky od počátku masového rozšiřování elektromobilů kolem roku 2008. Právě v roce 2015 však došlo k obrovské expanzi trhu v Číně, meziročně přibližně o 230 %, kdy se na tamním trhu prodalo téměř 177 tisíc vozidel označených jako PEV [6]. Spojené státy nicméně dominují díky vyšší kupní síle obyvatel na trhu luxusnějších elektromobilů, které zpravidla určují módní trendy a produkují inovace [7] [8].

Agregovaná data o prodeji elektrických vozidel a jejich registracích jsou žádaná a jejich autoři často zpoplatňují zveřejňování takovýchto statistik. Vývoj USA trhu najdeme zdarma na [8], kde vycházejí pravidelně měsíční reporty prodeje dle značek, viz např. report pro prosinec 2017 [9].

Existují studie, které odhadují, že trh elektromobilů jen v USA by mohl překonat hranici jednoho milionu prodaných kusů za rok již v roce 2024 [10]. Takové odhady je však třeba brát s rezervou, jelikož predikce vývoje trhu již na 1 až 2 roky je problematická. Je nicméně uznat, že milion prodaných kusů PEV ročně by znamenal více než desetiprocentní podíl celkového automobilového trhu v USA [11], což nelze považovat za zanedbatelné.

### **2.1.2 Evropa**

Evropa bude ve smyslu následující analýzy vztažená k elektromobilitě chápána jako EU plus Norsko a Švýcarsko. Ostatní státy kontinentu Evropa budou z komentáře vynechány ze dvou důvodů. Státy jako Ukrajina, Turecko, Island a nečlenské balkánské státy nejsou z hlediska vztahu k elektromobilitě v následujících několika letech významné ať již z důvodů kulturních nebo ekonomických. Ani zbývající Rusko není z hlediska elektromobility zajímavé, pravděpodobně úpadek tamního automobilového průmyslu a vztah obyvatel k životnímu prostředí totiž způsobují, že prodeje elektromobilů v celé zemi se pohybují na úrovni desítek kusů ročně navzdory významné legislativní podpoře [12].

Evropa ve smyslu výše uvedeného vymezení je některými autory považována za ještě příznivější pro rozvoj elektromobility než Spojené státy [13]. V žebříčku porovnávaným tzv. adoption rate, tedy míru přijímání elektromobilů do vozového parku dané země, se za hlavními světovými hráči dneška, Čínou a USA, zařadily jen samé evropské země [6]. Nutno podotknout, že žebříček je sestaven podle absolutních počtů prodaných elektromobilů v dané zemi v roce 2015. To poněkud zkresluje situaci z hlediska skutečné koncentrace elektromobilů, nicméně to přesně vystihuje tamní velikost trhu. Země jako Nizozemsko, Norsko, Velká Británie nebo Francie vykazují podíl elektromobilů na automobilovém trhu v řádu jednotek procent oproti USA nebo Číně, kde jde o desetiny procenta. Mezi nejvyspělejší trhy se v tomto ohledu řadí především Nizozemsko a Norsko. Tyto dvě země stojí v čele evropského žebříčku v absolutním počtu prodaných aut za rok 2015 (Nizozemsko s jeho přibližně 44 tisíci kusy) a v tržním podílu (Norsko s jeho úctyhodnými 22,4 % tržního podílu) [6] [14].

Je zřejmé, že poptávka po elektromobilech je v těchto evropských zemích silně stimulována legislativními a finančními subwencemi ze strany vlád. Otázka legitimity

či ekonomické efektivnosti takových opatření je v práci záměrně ponechána stranou. Norsko považuje vlastní trh za nejprůzračnější pro elektromobily na celém světě a je na tuto skutečnost patřičně hrdé [15]. Při výčtu všech pobídek se tomuto tvrzení nelze divit [16]. Přitom u elektromobilů nejde ani tak o stimulaci jejich nákupu a používání, jako o výjimku z místního přeregulovaného trhu automobilů. Ostatní evropské země jsou na tom s pobídkami různě, většinou však platí, že ekonomicky vyspělejší západní a severské země poskytují bohatší paletu pobídek než země méně vyspělé [17]. Rovněž platí, že vyspělejší země vykazují vyšší prodeje elektromobilů. Z toho by se dalo zdánlivě usuzovat, že vládní pobídky plní bezchybně svůj účel. Některé studie však tuto souvislost nevidí tak jednoznačně [18].

Evropa si každopádně drží silnou pozici v moderním trendu, který by se dal označit jako *global EV adoption* nejen díky své relativně silné kupní síle. Evropské politické elity již řadu let prosazují myšlenku udržitelnosti a s ní související myšlenku *zero-emission* dopravy. Zda je zvolená cesta vládních pobídek optimální z hlediska společenského či dokonce environmentálního je otázkou mimo oblast zájmu předkládané práce. Ta má za cíl adaptovat se na současné a očekávané budoucí prostředí a navrhnout způsob, jak v tomto prostředí jednat efektivně.

Pro novější statistiky z Evropy se můžeme obrátit přímo na asociaci ACEA [19], kde jsou ovšem reporty ve srovnání s ostatními zdroji i tak poněkud zastaralé [20].

### 2.1.3 Asie a zbytek světa

Asií budou dále myšleny především státy východní a jihovýchodní Asie. Zejména ty, které jsou buď dostatečně velké, nebo ekonomicky vyspělé, aby byly z hlediska globálního trhu elektromobilů významné. Asijský trh v tomto smyslu je trhem paradoxů a extrémů. Zatímco Čína prožila během roku 2015 díky zavedení vládních pobídek masivní expanzi trhu elektromobilů, Japonsko, dříve s téměř třetinovým podílem na globálním trhu, se v posledních letech propadá. Čína se dostala do čela absolutních prodejů v roce 2015, kdy téměř 177 tisíc prodaných osobních vozidel tvořilo meziroční nárůst o 233 % a celkově se podílelo 34,2 % na celosvětovém trhu. Čína zároveň v témže roce vykazovala růst i na agregovaném trhu nákladních vozidel, autobusů a komerčních vozidel na alternativní pohony [6]. Na druhou stranu Japonsko bylo ještě v roce 2013 na druhém místě v absolutním počtu prodaných elektromobilů. V roce 2015 se však propadlo až na 8. místo [6].

Zdá se, že v poslední době si obyvatelé rapidně rostoucích východoasijských metropolí začínají uvědomovat, že *zero-emission* osobní doprava je nejen zbaví emisí CO<sub>2</sub>, ale též ostatních plynů vznikajících ve spalovacím motoru osobního auta. Ty totiž stále častěji způsobují významné znečištění ovzduší v oblasti těchto mnohamilionových metropolí, zejména v zimním období. Minimálně vlády těchto zemí si problému všimly a některé již zareagovaly agresivní politikou subvencí čistších způsobů dopravy. To vyústilo ve výše komentovaný rozvoj trhu s elektromobily zejména v Číně. Začátkem roku 2016 byl v indickém Dillí a čínských urbanizovaných provinciích na východě země omezen pohyb

vozidel se spalovacím motorem. Mnohé východoasijské státy přijaly politiky pro rozvoj místního průmyslu relevantního k čisté dopravě a stanovily si cíle pro rozvoj místního vozového parku stejným směrem. Čína například chce do roku 2020 zavést 5 milionů vozidel využívajících nové zdroje energie, tzv. NEVs [1].

Ostatní světové regiony nejsou z hlediska elektromobility zatím příliš zajímavé. Opět je důvodem potenciální velikost trhu daná buď nízkou ekonomickou výkonností, malým počtem obyvatel, nebo jejich nízkou hustotou. Z rozvinutých zemí připadá v úvahu Kanada, kterou však lze snadno agregovat do prodejů v USA. Austrálie, s její nízkou hustotou obyvatelstva a elektrickou energií vyráběnou především z fosilních paliv, není pro rozvoj elektromobility zatím příliš zajímavá. Uvádí se, že pro australský trh jsou ostatně zajímavější spíše hybridy typu PHEV [21]. Státy Střední a Jižní Ameriky jsou aktuálně ve stavu *emerging markets*. Někteří nízkonákladoví výrobci na ně cílí, avšak prodávají se spíše nákladní užitné vozy či autobusy do tavných metropolí. Koncoví uživatelé nejsou dostatečně početní a nedisponují dostatečnou kupní silou, navíc v zemi chybí nezbytná infrastruktura [22] [23]. Prodeje elektromobilů v nejbohatší zemi afrického kontinentu – Jihoafrické republice dosahují desítek kusů ročně a nejsou z globálního hlediska zajímavé [24].

Zdarma dostupné statistiky o největším asijském trhu, poskytuje [25], avšak má poměrně nešťastně zvolený formát jejich prezentace. V tomto článku je možné vidět prodeje v Číně za celý rok 2017 [26]. Pro celosvětový pohled se však musíme obrátit na EV Volumes [27], které používá jako zdroj informací v tomto oboru i britský Guardian [28]. Problém je, že EV Volumes sice disponuje kvalitní databází použitelnou pro více účelů (viz kap. 8.3), ale tato databáze je přímo nedostupná a ad hoc reporty jsou zpoplatněné.

Při snaze o celkový pohled se tedy musíme spolehnout na článek z konce roku 2017 [28] založený na datech z EV Volumes o tom, že na světových silnicích se ve tomto období pohybovalo 3 miliony elektromobilů.

#### **2.1.4 Statistiky a predikce**

Závěrem kapitoly o globálním stavu elektromobility je nutno poznamenat několik skutečností. Ty se týkají především přesnosti a úplnosti předložených statistik. Globální statistiky jsou tvořeny často z různých spolehlivých zdrojů, přičemž navíc každý zdroj může používat jiné typy časových období. Statistiky prodejů jednotlivých značek elektromobilů nejsou dokonalé ani na nejlépe zdokumentovaném trhu ve Spojených státech. Většina prodejců uvádí své prodeje po měsíčních intervalech, někteří však po čtvrtletích a jiní nevykazují objemy svých prodejů oficiálně vůbec [8]. Je proto nutno brát reportované prodeje spíše jako relativně přesné odhady než jako naprosto přesná data.

Nepřesnost do statistik vnáší též absence statistik pro některé regiony. I když evropské státy mají prodeje relativně zmapované podobně kvalitně jako USA, východoasijské státy už statistiky nevedou zdaleka tak důkladně. Je to mimo jiné proto, že na východoasijském trhu působí hlavně lokální nízkonákladoví výrobci, u nichž zveřejňování statistik buď není prioritou, nebo se data nedostanou přes kulturně-jazykovou bariéru.

S přesností a vypovídací schopností statistik prodeje souvisí i druhá komplikace. Jde o vztah místa prodeje a skutečného bydliště kupujícího. Fakt, že některý z výrobců elektromobilů reportuje prodeje v určitém státě ještě neznamená, že kupující bude v tomto státě elektromobil užívat. Toto není jinak ojedinělý fenomén, jelikož v mnoha především menších státech, ke kterým se řadí i Česko, neexistuje distributor vozidel. Občané těchto států proto musí nakupovat elektromobily v zahraničí, což se do statistik promítne jako růst prodeje v jiném státě, než je skutečné bydliště kupujícího. To samo o sobě sice nijak nesnižuje celkové prodeje dané značky, má to ale klamný efekt na regionální příslušnost nakoupeného elektromobilu. Pokud by se takto zkreslená data měla považovat za směrodatná v problematice budování infrastruktury, pak by se infrastruktura budovala pouze v těch státech a lokalitách, kde existují distributoři elektromobilů, nikoliv tam, kde jsou elektromobily skutečně využívány. Z toho důvodu je vhodnější používat spíše statistiky registrací vozidel.

Poslední poznámka se týká přesnosti predikcí o vývoji elektromobility. V tomto směru není třeba uvádět všechny problémy spojené s predikcí a slabá místa takovýchto tvrzení. Jako jeden příklad za všechny postačí ukázka vývoje predikcí společnosti specializované na průzkumy trhu v průběhu dvou následujících let a jejich srovnání se skutečnými daty. Společnost Navigant Research ve své studii vypracované během roku 2013 uvedla, že roční globální prodeje elektromobilů budou v roce 2014 čítat 352 tisíc kusů a očekávají růst na 1,8 milionu kusů v roce 2023 [29]. O rok později ta samá společnost odhadovala, že v roce 2015 dosáhnou globální prodeje 2,6 milionu elektromobilů, přičemž tato hodnota by se do roku 2024 měla zvýšit na 6 milionů kusů [30]. Oficiální údaje přitom hovoří o 315 tisících prodaných elektromobilů za rok 2014 a 520 tisících za rok 2015 [6]. Na tomto příkladu je vidět problematičnost predikcí už na rok do budoucna, nehledě na predikce na časové období deseti let. Z predikčního nezdaru jedné marketingové agentury nelze sice vyvozovat závěr o nemožnosti podobných predikcí obecně, je však třeba brát na zřetel významnou míru nejistoty obsaženou v podobných tvrzeních.

## 2.2 Stav a budoucnost elektromobility v ČR

Výchozím dokumentem podporujícím aktuálnost a relevantnost předkládané práce je Národní akční plán čisté mobility (NAP CM) [31]. Jedná se o závazný plán Ministerstva průmyslu a obchodu ČR plnit Směrnici evropského parlamentu a rady 2014/94/EU [32] o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva. NAP CM je aktuálně platný pro období 2015-2018 s výhledem do roku 2030 a je průběžně aktualizován každé tři roky. Zabývá se technologií a trhem alternativních paliv v odvětví dopravy a příslušné infrastruktury, zejména elektromobilitou, CNG, LNG a technologií palivových článků. Oficiálně deklarovaným cílem NAP CM je: *„Vytvoření dostatečně příznivého prostředí pro širší uplatnění vybraných alternativních paliv a pohonů v sektoru dopravy v podmínkách ČR a dosažení podmínek srovnatelných v této oblasti s jinými vyspělými státy Evropské unie tak, aby v dlouhodobém horizontu (období po roce 2030) byla elektromobilita vnímána jako standardní technologie a zemní plyn pak jako standardní palivo a vodíková technologie se dostala minimálně z fáze výzkumu/vývoje do situace, v jaké se v*

*současnosti nachází elektromobilita, tj. aby byla realizována určitá základní opatření k rozvoji této technologie ve střednědobém a dlouhodobém horizontu.*“ [31]. Konkrétní plánované důsledky takového závazku viz například zde [33].

Na tomto cíli, speciálně jeho části o elektromobilitě, lze jasně ukázat oficiální dlouhodobý záměr vlády ČR aktivně rozvíjet podporu elektromobilů a příslušné infrastruktury na území České republiky. NAP CM je navíc podepřen základními strategickými dokumenty ČR v oblasti energetiky: Státní energetická koncepce [31], dopravy: Dopravní politika ČR pro období 2014-2020 s výhledem do roku 2050 [34] a životního prostředí: Státní politika životního prostředí ČR 2012-2020 [35].

Co se konkrétních statistik týče, za rok 2017 se v ČR registrovalo 3100 plně elektrických nebo hybridních vozidel. Toto číslo však objektivně nedemonstruje skutečnost, jelikož plně elektrických z nich bylo jen 307 [36]. Toto množství je oproti vyspělým zemím světa a zejména srovnatelným zemím západní Evropy nízké, i když jej vezmeme per capita. V této práci se nebudeme snažit tuto skutečnost objasnit, několikrát se jí však dotkneme a pokusíme se ji zasadit do širšího kontextu.

### **2.3 Aktuální dění ve světě elektromobility**

V této kapitole bude v návaznosti na kapitoly předchozí průřezově zmapován nedávný a aktuální vývoj ve světě elektrické pozemní dopravy. Součástí autorova výzkumu přirozeně bylo sledování aktuálního dění v oboru elektromobility, přičemž čerpal především ze zpravodajských serverů a zájmových rubrik nejružnějších relevantních portálů. Z tohoto obrovského množství informací budou nyní na základě autorova kvalifikovaného úsudku vybrány významné události demonstrující současné hlavní trendy oboru elektromobility. To znamená, že oproti kapitolám 2.1 a 2.2, kde byl svět elektromobility prezentován v tvrdých statistikách vývoje trhu a platné legislativě, zde budou použity zdroje „měkčí“, pomocí kterých budou mapovány společenské trendy, technologické novinky a oznámené plánované záměry důležitých hráčů v oboru.

Literární zdroje této sekce lze rozdělit na domácí a zahraniční média, přičemž zcela jistě lze očekávat, že se budou tematicky překrývat. To znamená, že česká média pochopitelně sledují vedle domácího dění také dění v zahraničí a navíc, více serverů může ze svého pohledu zachycovat tutéž zprávu, případně jedna skutečnost ze světa elektromobility může být prezentována více zpravodajskými servery.

Mezi česká média zahrneme především Hybrid.cz [37], OEnergetice.cz [38] a zDopravy.cz [39], která lze označit za tematicky zaměřené zájmové weby. Dále pak web ecoFuture.cz [40] společnosti EON a web EMobilita.cz [41] společnosti ČEZ, což jsou stránky výrobců a distributorů energie působících na území ČR.

Mezi zahraničními zdroji je podstatně širší výběr a je těžké je všechny objektivně zmapovat. Vybrané budou takové, které autor v minulosti aktivně sledoval, které jsou informačně kvalitní, často aktualizované a které nějakou měrou pojednávají o tématech souvisejících s ČR. Z tohoto výběru tedy budou vyčleněna média pojednávající pouze o

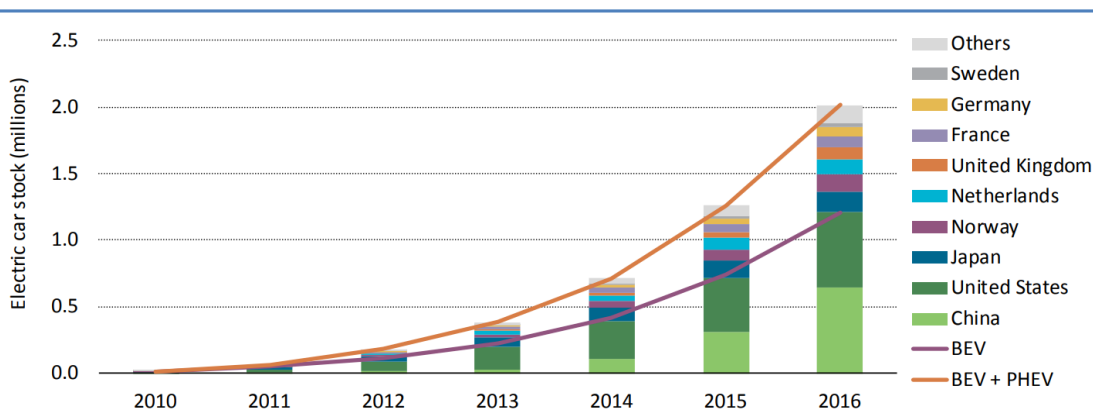
určitém zahraničním regionu. Kvalitní a často citovaný je web EVObsession.com [42], dále pak CleanTechnica.com [43] nebo InsideEVs.com [44]. Dále můžeme čerpat z magazínu Charged [45], webu electrek.co [46] nebo tematickou sekci webu Wired [47]. Pochopitelně je vhodné nezapomenout na sekci o elektromobilech na webu Evropské asociace automobilového průmyslu ACEA [48].

Než se pustíme do samotné rešerše těchto zdrojů, nutno dodat, že zejména domácí Hybrid.cz zde má výsadní postavení, jelikož jde o web domácí, téměř denně aktualizovaný a pokrývající problematiku již po velmi dlouhou dobu (již od roku 2006).

Zajímavé je vzít jeden ze starších článků o nabíjecí infrastruktuře z webu Hybrid.cz [49] a reflektovat jej se situací dnes. Před necelými 8 lety se pojem elektromobilita skloňoval zcela v jiném smyslu než dnes. Jistě, technologie jako taková se nijak dramaticky nezměnila, od té doby sice došlo k navýšení dojezdu elektromobilů, jejich výkonu, došlo ke snížení jejich ceny, zrychlily se nabíjecí stanice a narostl jejich počet. Očekávaná revoluce v technologii kompaktního uchování elektrické energie formou nové generace baterií však nenastala. Jistá revoluce se přece jen za ty roky udála a to revoluce kulturní, revoluce v myšlení lidí, v jejich vztahu k myšlence elektromobility. Skepticismus či nadšení jednotlivců ponechme stranou a snažme se sledovat tržní a legislativní projevy zájmu o elektrická vozidla. Tržní projevy budou indikátorem skutečného zájmu jednotlivců, legislativní projevy pak projevem záměrů vlád.

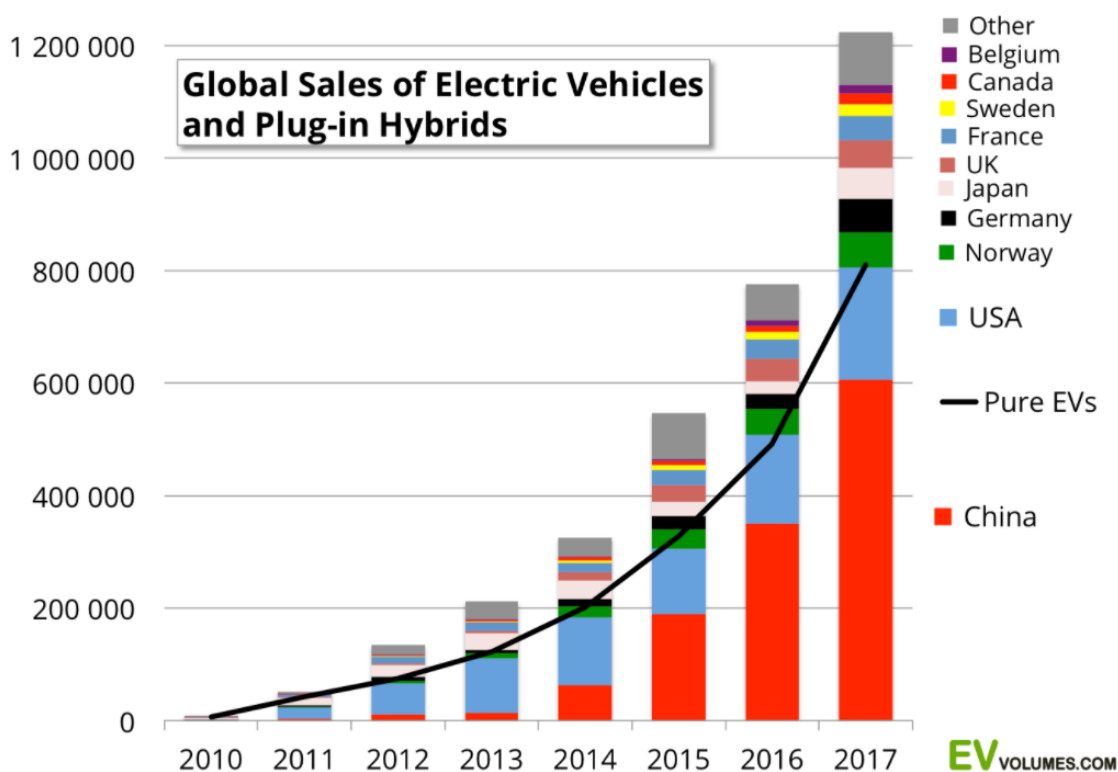
Celkový počet (chápáno jako kumulativně registrovaná vozidla) provozovaných elektromobilů z pohledu celého světa zachycuje obr. 1 až do roku 2016. Stav pro rok 2017 pak můžeme odhadnout z obr. 2, kde jsou znázorněny prodeje za jednotlivé roky. Pro konec roku 2017 tedy platí, že na celém světě se pohybuje přes 3 miliony elektrických vozidel, přičemž prim hraje jednoznačně Čína a za ní USA.

Figure 1 • Evolution of the global electric car stock, 2010-16



Obr. 1: Vývoj světového počtu elektromobilů  
(Zdroj: [5])





Obr. 2: Globální počty prodejů čistých elektromobilů a hybridů  
(Zdroj: [50])

Z těchto dvou grafů je vidět jednoznačný, v čase rostoucí zájem zákazníků o elektrická vozidla. Jistě, můžeme namítnout, že ne vždy mohou být motivy nakupujících ušlechtilé. Často jsou nakupující spíše pobízeni vládou nekupovat ICEV, často PEV kupují spíše pro nízkou subvencovanou cenu, pro nižší provozní náklady a daňové úlevy. Jejich primárním motivem nemusí být snaha o čistší vzduch a záchranu planety před globálním oteplováním. Pravdou však je, že z hlediska problematiky nabíjecí infrastruktury jsou nákupní motivy uživatelů PEV prakticky irelevantní. Jakmile je na světě v provozu přes 3 miliony vozidel, musí existovat odpovídající infrastruktura. Netřeba řešit, z jakého důvodu se tyto 3 miliony vozidel na silnicích objevily. Na veřejnost se takové statistiky obvykle dostanou jako pokošení určitých milníků, viz prodeje elektrických vozidel za rok 2017 v USA [51] pokořily 200 tisícovou hranici.

V předkládané práci jsou ve značném rozsahu využívány externí datové zdroje. Kapitola 5 poskytuje jejich bližší popis a kapitola 6.3 pak argumentuje, proč jsou kvalitativně nedostačující. Existující datové zdroje zejména neodpovídají uspokojivě na otázku, jakým způsobem se lidé pohybují po území ČR. První průzkum, který by snad dokázal na tuto otázku dát uspokojivé odpovědi, je aktuálně probíhající (první polovina roku 2018) celostátní průzkum dopravního chování obyvatel ČR [52]. Výsledky tohoto průzkumu ovšem budou známy koncem roku 2018 či spíše až v roce 2019, tedy bohužel až po zveřejnění předkládané práce.

Existují však průzkumy, kterými se lze inspirovat již nyní. Zajímavá zjištění ohledně důvodů k pořízení PEV vyplývají z průzkumu přibližně 2000 majitelů elektrických

vozidel [53]. Vyplývá z něj, že zdaleka ne všichni si pořizují elektromobil primárně kvůli starosti o životní prostředí. Jde sice o nejdůležitější faktor, ale pouze v 33 % až 45 % případů. Motiv zájmu o technologické novinky uvádí 23 až 50 % respondentů. Čísla se velmi liší podle regionu a typu elektromobilu, takže nelze jednoznačně agregovat výsledky pro elektromobily jako celek. Dalším zjištěním je, že i když je nejdůležitějším parametrem dojezd a rychlost nabíjení, požadovaný dojezd na jedno nabití je přibližně 320 km, což není hodnota na trhu nějak zásadně nedostupná a zcela vyvrací obecnou představu, že průměrný zákazník požaduje dojezd 700 km a více. Nutno dodat, že respondenti (majitelé elektromobilů) byli většinou muži s lokálně nadprůměrnými příjmy žijící v menších městech. Přestože výzkum zahrnuje relativně malý vzorek lidí (2000 není z globálního hlediska příliš), jde o jeden z největších průzkumů v tomto oboru.

Podle průzkumu z poloviny roku 2017 naopak mezi českými řidiči [54] je jednou z hlavních příčin odmítání elektromobility vysoká cena. I když si jsou respondenti za alternativní zdroje pohonu ochotni připlatit, jsou velmi citliví na cenu. Pořizovací cena je primárním kritériem, náklady na provoz a údržbu hned v závěsu. Z výsledků tohoto průzkumu se tedy dá konstatovat, že čeští majitelé vozidel se rozhodují spíše podle celkových nákladů na vlastnictví (TCO), než pouze podle pořizovací ceny vozidla. To je poměrně povzbudivé, jelikož PEV TCO a ICEV TCO se pravděpodobně přiblíží rychleji, než by tomu bylo v případě pořizovacích cen PEV a ICEV. Zajímavé srovnání na toto téma poskytuje [55].

Koncem roku 2017 oznámila automobilka Škoda bližší obrysy nového vlastního elektromobilu [56]. Z globálního hlediska nejde o zprávu nijak zásadní, ostatně Volkswagen vlastníci Škodu se na trhu elektromobilů pohybuje již delší dobu a úspěšně. Pro českého zákazníka s jeho pohledem na Škodu jako osvědčené rodinné stříbro to však může znamenat překročení další překážky v přijetí elektromobility.

Častým argumentem proti masové elektromobilitě, potažmo obnovitelným zdrojům energie, bývá přetěžování již tak dost vytížené přenosové soustavy, což v Německu bývá dokonce pravidelně vyčíslováno [57] [58]. Jedním z konceptů, který má přetěžování sítí vyřešit je technologie Vehicle-to-Grid (V2G). Například vláda Velké Británie si je této skutečnosti vědoma a aktivně projekty vznikající na této technologii podporuje [59].

Koncem roku 2017 byla v Norsku více než polovina z prodaných vozů elektromobilem [60]. Norsko je ostatně příkladem země, kde se s budováním dostatečné nabíjecí infrastruktury museli vypořádat už dávno [61]. Ani SRN ovšem nezaostává ve výstavbě infrastruktury [62]. V polovině roku 2017 mělo Německo přibližně 10700 nabíjecích míst, přičemž do roku 2020 by se toto číslo mělo zvýšit na 35 až 70 tisíc veřejně dostupných nabíjecích míst. Přesná hodnota plánu se liší podle subjektu, který budoucí plán doporučuje. Z celoevropského pohledu pak v téže době fungovalo asi 100 tisíc nabíjecích míst [63], které obsluhovaly přibližně 550 tisíc PEV a PHEV. Infografika přiložená v citované práci poskytuje informace o rozložení vozidel napříč evropskými státy.

V Norsku šli zákonodárci ještě dál a počátkem roku 2017 se Oslo rozhodlo zakázat vjezd dieselových vozidel [64]. Nutno dodat, že Norové mají zřejmě jinak postavenou laťku pro míru znečištění ovzduší než obyvatelé čínského hlavního města [65], kde znečištění smogem dosahuje v posledních letech z evropského pohledu zcela nepředstavitelných hodnot.

Klimatické cíle EU se promítají do opatření národních vlád členských zemí. Pro ČR se toto projevuje například jako zavádění dotačních programů na podporu nabíjecí infrastruktury [66]. Dotační politika jednotlivých zemí EU se v průběhu času měnila, viz příklad z Německa. V této aktualitě [67] je popsán spor americké automobilky Tesla Motors s vládou SRN, kdy německá legislativa prakticky ruší dotace na luxusní modely elektromobilů, prodávané na místním trhu zejména touto americkou společností. Tato situace je o to paradoxnější, když si uvědomíme dlouhodobý záměr vlády SRN elektromobilitu velmi razantně podporovat [68]. To sice může působit z hlediska vlády SRN poněkud ambivalentně, ovšem pravý důvod může být mnohem prostší. Přes urputné vládní snahy o získání image podporující volný obchod jde pravděpodobně o podporu lokálních producentů elektromobilů na úkor zámořské, v současnosti technologicky vyspělejší konkurence.

S elektromobilitou se pojí snaha o předpovědi ohledně jejího budoucího vývoje. Takových předpovědí se dopouští nejrůznější subjekty od jednotlivých osob až po velké organizace či vlády. Nejčastějšími příspěvky do této sbírky prorocství jsou různé odhady stavu elektromobility v určitém velmi vzdáleném roce, přičemž je z tohoto stavu zároveň odvozen širší společenský dopad. Několik takových prohlášení nejrůznějších subjektů světového významu je komentováno v článku o očekávaném dopadu elektromobility na poptávku po benzínu [69]. K prohlášením podobného typu je nutné přistupovat vždy obezřetně, zejména proto, že je nelze brát doslovně. I prohlašující subjekt jistě ví, že statistická chyba takové predikce obrovská, že letopočet 2030 není výsledkem nějakého přesného predikčního modelu, ale je spíše informovaným hrubým odhadem. Takové prohlášení je tudíž spíše ujištěním veřejnosti, že daná organizace v současnosti věří v myšlenku elektromobility, než vážně myšlenou předpovědí budoucího stavu.

Analogicky lze chápat prohlášení indické vlády [70] o záměru podpory elektromobility, výhled organizace OPEC [71] o jejich celkovém počtu, se kterým i největší ropný kartel musí počítat, nebo související odhad poptávky po uhlí Mezinárodní agentury pro energii [72]. Takto by se dalo pokračovat, ale cílem není výčet těchto předpovědí, pouze demonstrace, jak běžně se v tomto oboru vyskytují a jak fakticky rozdílné tyto předpovědi obvykle jsou.

Nejvíce relevantní jsou ovšem články pojednávající přímo speciálně o nabíjecí infrastruktuře. Inspirovat se lze hned FAQ sekcí na webu ČEZu [73], kde se dozvídáme, že minimálně v ČR je ČEZ z hlediska dobíjecích infrastruktury velmi silný hráč s jednoznačnou strategií do budoucna. Hned první otázka: „*Jak vybírá Elektromobilita ČEZ lokality pro výstavbu veřejných dobíjecích stanic?*“, je z hlediska zkoumaného

tématu nesmírně zajímavá, jelikož má přímou vazbu na problematiku rozmístění nabíjecích stanic.

ČEZ jako jeden z velkých hráčů domácího energetického trhu s rozvojem nabíjecí infrastruktury dlouhodobě počítá nejen pro elektromobilitu jako takovou, ale i pro rozvoj vlastního podnikání v energetice. Ostatně, nabíjecí infrastruktura ve vyspělých zemích má už poměrně významný dopad na odvětví energetiky [74]. Společnost ČEZ již aktuálně provozuje velké množství stanic [75] a nově aktivně plánuje [76]. Čas od času se významné milníky v rozvoji nabíjecí infrastruktury dostanou i do médií [77] jako připomínky pro širokou veřejnost, že se nabíjecí stanice budují nejen v celé západní Evropě, ale i u nás.

Nabíjecí infrastrukturu není snadné správně rozmístit a výběr konkrétních míst zohledňuje množství faktorů. Konkrétní lokalita však nemusí být vždy bytový komplex, firemní či komerční parkovací plochy, nebo odpočívadla u dálnic a rychlostních silnic. Nabíjecí infrastruktura je budována i na tradičních čerpacích stanicích [78]. Tento dříve zavrhaný koncept se možná přece jen dočká dílčího uplatnění. Ostatně v dálkové dopravě se smysl dálničních odpočívadel a čerpacích stanic až tolik neliší [70].

Uvedený výčet zdrojů je spíše ilustrativní. Celý proces rešerše literatury z oboru elektromobility byl a je kontinuální a spočíval a spočívá v každodenním sledování zájmových webů, aktualit, novinek a celého kulturního dění kolem tohoto tématu. Tak autor získal a získává znalosti uplatnitelné při tvorbě předkládané práce, které ovšem svým rozsahem převyšují kapacitní možnosti této kapitoly.

## 2.4 Základní odborná literatura

Nyní se přesuňme k základní odborné literatuře vztahující se k oboru. Práce se sice zabývá elektromobilitou, oborem zde ovšem máme na mysli souhrnně multioborové propojení vybraných statí operačního výzkumu a matematické informatiky. Zejména bude kladen důraz na modelování, simulaci, optimalizaci, strojové učení a soft computing, vše v takovém pojetí, aby z výsledků bylo možné vyvodit ekonomický závěr. Definovaný problém je nutné uchopit určitým způsobem, přistoupit k němu v určitém myšlenkovém a metodologickém kontextu. Tento širší kontext bude čtenáři odhalen rešerší vybraných základních literárních zdrojů.

Spojujícím tématech všech uvedených oborů je modelování. Bez pochopení procesu modelování by nebylo možné vytvořit model problému, bez modelu by neexistoval objekt, který využívají procesy optimalizace, simulace, nebylo by co strojově učit.

O modelování obecně pojednává například Janíček [2], praktické příklady modelování popisuje Dostál [79]. Procesem modelování z pohledu operačního výzkumu se zabývá Hillier [80]. Vzhledem k povaze pojmů model a modelování, nemá smysl se zde podrobněji pozastavovat a snažit se čtenáři předložit celou teorii modelování. Pro dodržení konvence však uveďme alespoň Janíčkovu definici modelu [2]: „*Model je subjektem účelově vytvořený reálný nebo abstraktní objekt, který obsahuje všechny*

*podstatné charakteristiky primárního objektu, a který se týká určitého zájmu subjektu o tento objekt.“, a jeho definici modelování: „Modelování je soubor činností subjektu, spjatých s tvorbou a realizací modelu, s cílem vyřešit konkrétní problém na konkrétním objektu pro zvolenou rozlišovací úroveň procesu řešení.“*

Modelováním a typy použití modelů se zabývá teorie modelování, kterou Janíček velmi hutně a výstižně představuje [2]. Chceme-li nějak stručně opsat její obsah, pak jde o rámec znalostí a postupů umožňující jejich uživateli provést proces modelování úspěšně, avšak za podmínky, že je schopen do tohoto procesu zapojit nemalé tvůrčí intelektuální úsilí.

Speciálním typem modelů jsou modely optimalizační. Model navržený v předkládané práci je v celkovém pojetí modelem optimalizačním. O optimalizaci Dostál [79] píše, že je to matematická disciplína, ve které hledáme minimum, resp. maximum, dané funkce  $f(x)$  na dané množině  $M$ , přičemž této funkci říkáme účelová funkce. Janíček [2] popisuje optimalizaci jako proces, v jehož rámci se hledají takové hodnoty nezávisle proměnných, aby při určitých omezeních na ně kladených, dosahovala závisle proměnná extrémní hodnotu. Nezávisle proměnné se nazývají  $n$ -dimenzionální vektor optimalizačně proměnných a jejich typy souvisí s typem objektu, resp. optimalizačního problému.

Zelinka [81] rozebírá optimalizaci podrobněji. Zejména se zaměřuje na problémy s optimalizací spojené a na zdroje těchto problémů. Uvádí, že komplikace mohou vzniknout a) z důvodu přílišné velikosti prohledávaného prostoru proměnných, b) matematický model problému může být až příliš zjednodušený, takže získané výsledky nejsou aplikovatelné na realitu, c) účelová funkce může podléhat šumu, a tak nelze jednoznačně stanovit jediné optimální řešení, d) možná řešení problému jsou v prostoru proměnných rozložena velmi roztroušeně a jejich nalezení je proto extrémně obtížné.

Z těchto důvodů existují různé typy metod řešení optimalizačních úloh, přičemž členění těchto metod poskytuje Zelinka hned ve třech různých variantách [82]. Na obr. 3 je Vesterstormovo členění [83] vyzdvihující rozdíl mezi exaktními a heuristickými metodami, kdy jde především o rozdílnost ve způsobu prohledávání prostoru proměnných. Toto dělení se liší od Zelinkova dělení [81] na obr. 4, kde je kladen důraz na míru náhodnosti v prohledávacím procesu. Jestliže uvážíme problémy spojené s prohledáváním deklarované v předchozím odstavci, pak Verterstormovo členění koresponduje s tím, zda se těchto problémů vyskytuje při optimalizaci hodně nebo málo. Jestliže se jedná o optimalizační problém, jehož řešení je spíše triviální, tj. jde o běžnou úlohu, jejíž prostor proměnných není příliš „komplikovaný“, pak se může vybírat metoda spíše z kategorie tradičních metod. V opačném případě jen nutno sáhnout do kategorie heuristik.

Zelinkovo členění poskytuje mírně odlišný pohled, i když s problematikou složitosti rovněž souvisí. Jednodušší a rozsahově menší problémy půjdou zřejmě řešit enumerativně, popř. deterministicky, na složitější problémy pak použijeme stochastickou nebo smíšenou metodu. Rozdíl mezi těmito typy je však zejména v tom, jak se algoritmus

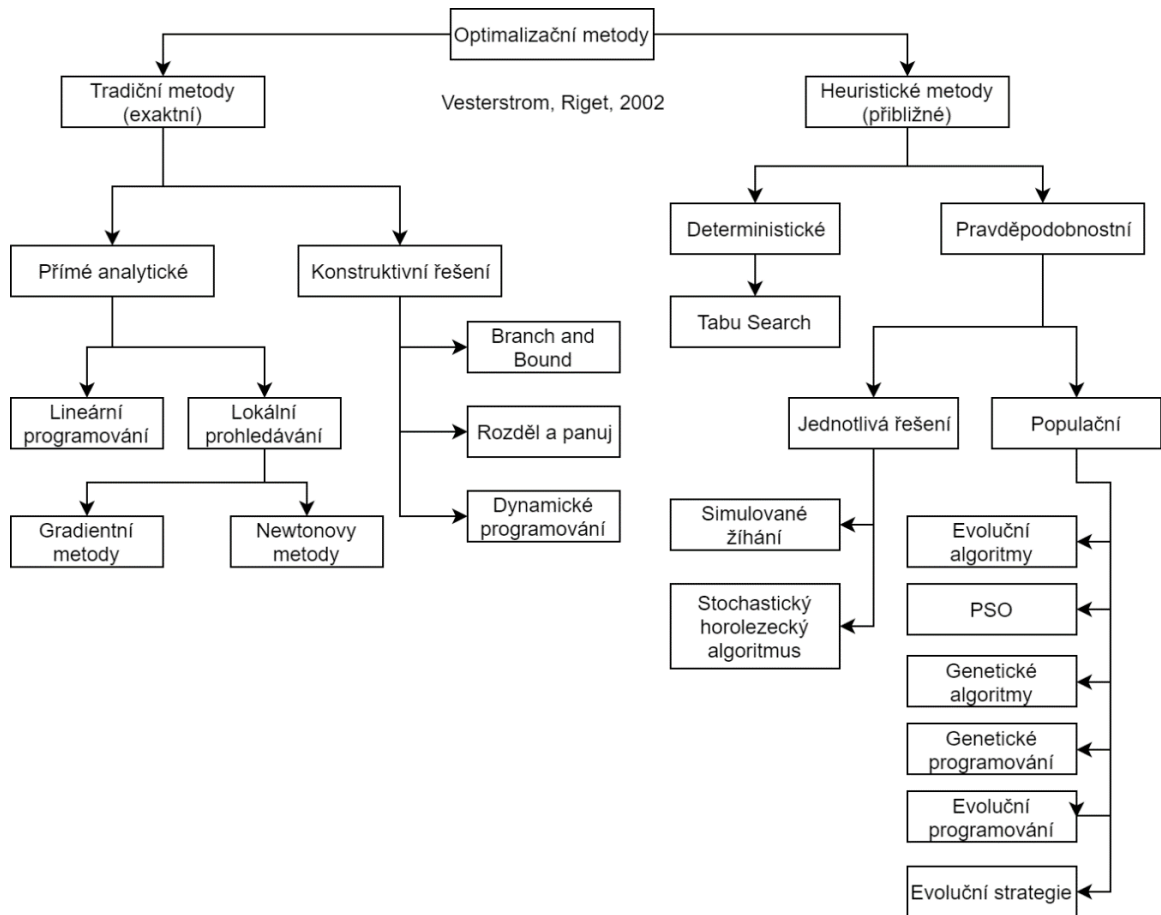
v prostoru proměnných chová, resp. jak probíhá jeho konvergence k extrému. U enumerativních metod je situace jasná, konvergence v podstatě neprobíhá, prostor proměnných musí být ohodnocen celý a z těchto ohodnocení se vybere takové, které nejlépe vyhovuje optimalizačnímu kritériu. Deterministické metody využívají deterministické konvergence k extrému, což samo o sobě ještě nezaručuje, že nalezený extrém bude extrémem globálním. Schopnost nalezení jiného extrému, než u kterého byl algoritmus spuštěn, je omezená, resp. algoritmus sám o sobě nedokáže lokální extrém opustit. Aby toho byl schopen, musela by jej ovládat nějaká nadřazená logika umožňující například zvolení alternativního počátečního bodu konvergence.

Stochastické metody a metody smíšené (využívající nějakou míru stochasticity) ze Zelinkova rozdělení pak jsou schopny lokální extrém opustit a přesunou se v prostoru na místo, odkud začnou hledat lokální extrém jiný. Tato vlastnost však může být vykoupena částečnou nebo úplnou absencí konvergence (např. typicky u metody Monte Carlo), takže proces prohledávání prostoru proměnných je spíše podobný metodě enumerativní, avšak s tím rozdílem, že tento prostor se neprohledává systematicky celý, ale z důvodu jeho příliš velkého rozsahu je prohledáván náhodně. Nejlepší řešení je pak vybráno analogicky jako u metody enumerativní.

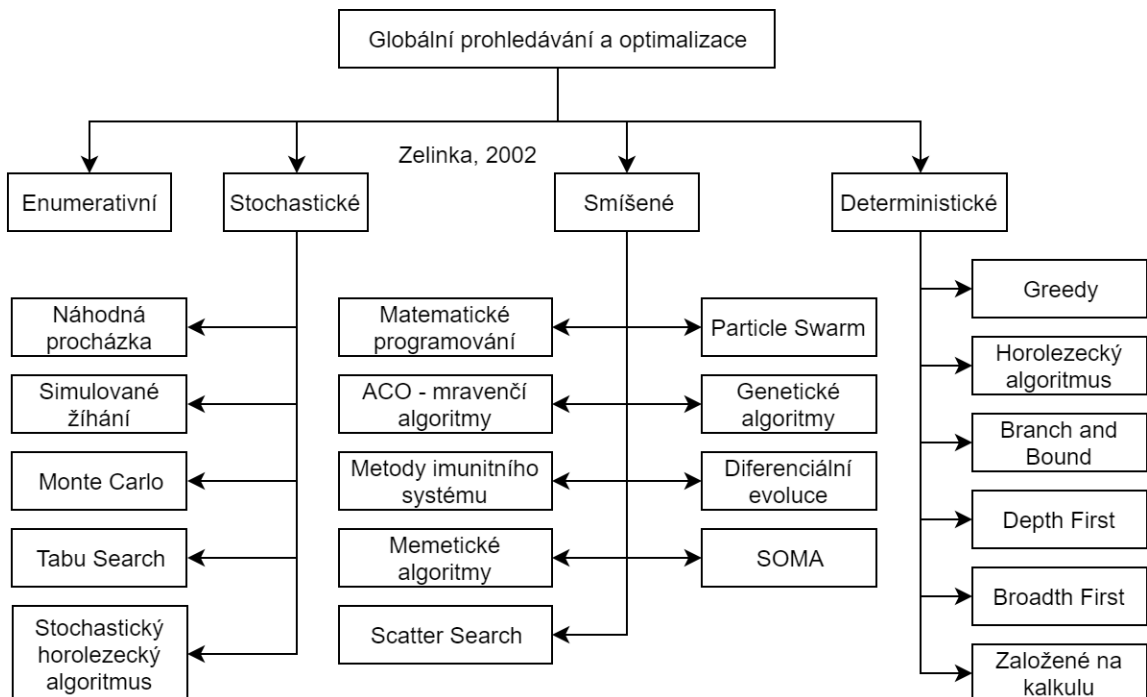
Metody smíšené jsou pak těmi, které se nejvíce podobají Vesterstrormovým metodám heuristickým. Tyto metody dokáží i obrovský prostor proměnných prohledávat obrazně řečeno „chytře“ či „cíleně“, což obvykle znamená, že úspěšně konvergují ke globálnímu extrému i přes mnohé extrémy lokální. Tyto metody jsou zároveň velmi různorodé, průběh pohybu prostorem proměnných od libovolného počátečního bodu až ke globálnímu extrému silně závisí na jejich typu a jako takové je velmi těžké je zařadit do užších kategorií. Intuitivně však všechny Zelinkou vyjmenované algoritmy z kategorie Smíšené patří do jediné skupiny i proto, že poskytují podstatně vyšší úroveň robustnosti a aplikovatelnosti než algoritmy z ostatních kategorií.

Dostálovo členění na obr. 6 používá podobné členění jako Zelinka, přidává však ještě dělení z hlediska zdroje inspirace autorů algoritmů. Zejména dělí evoluční algoritmy na ty inspirované živou přírodou a ty inspirované neživou přírodou. V kategorii živé přírody pak algoritmy ještě dělí na individuální, sociálně společenské a ostatní podle toho, zda objekt z populace možných řešení je chápán jako stavební jednotka jednoho jedince, nebo jako jedinec, který je součástí větší skupiny.

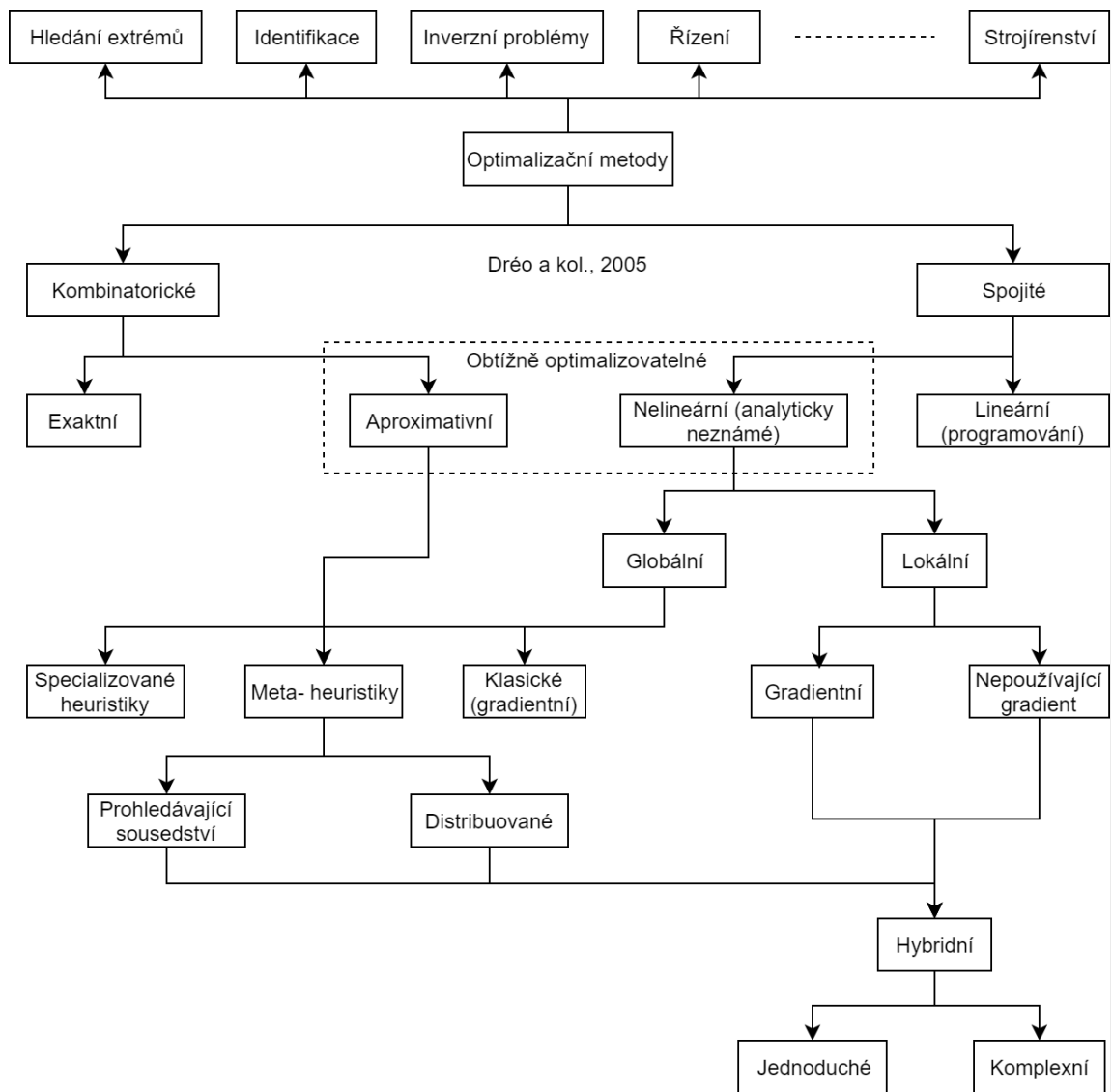
Dréovo dělení na obr. 5 pak dokresluje celou situaci. Prostor proměnných může být buď diskrétní (kombinatorické problémy) nebo spojitý. Další kategorie jako lokálnost nebo globálnost prohledávání, linearita, exaktnost, distribuovanost, ty vše demonstrují hlediska, ze kterých je možné algoritmy členit. Nyní krátce pojednejme o jednom z typů algoritmů, jehož problémově specifická implementace je použita v překládané práci, totiž o genetických algoritmech.



Obr. 3: Rozdělení optimalizačních metod podle [83]  
(Zdroj: [82])

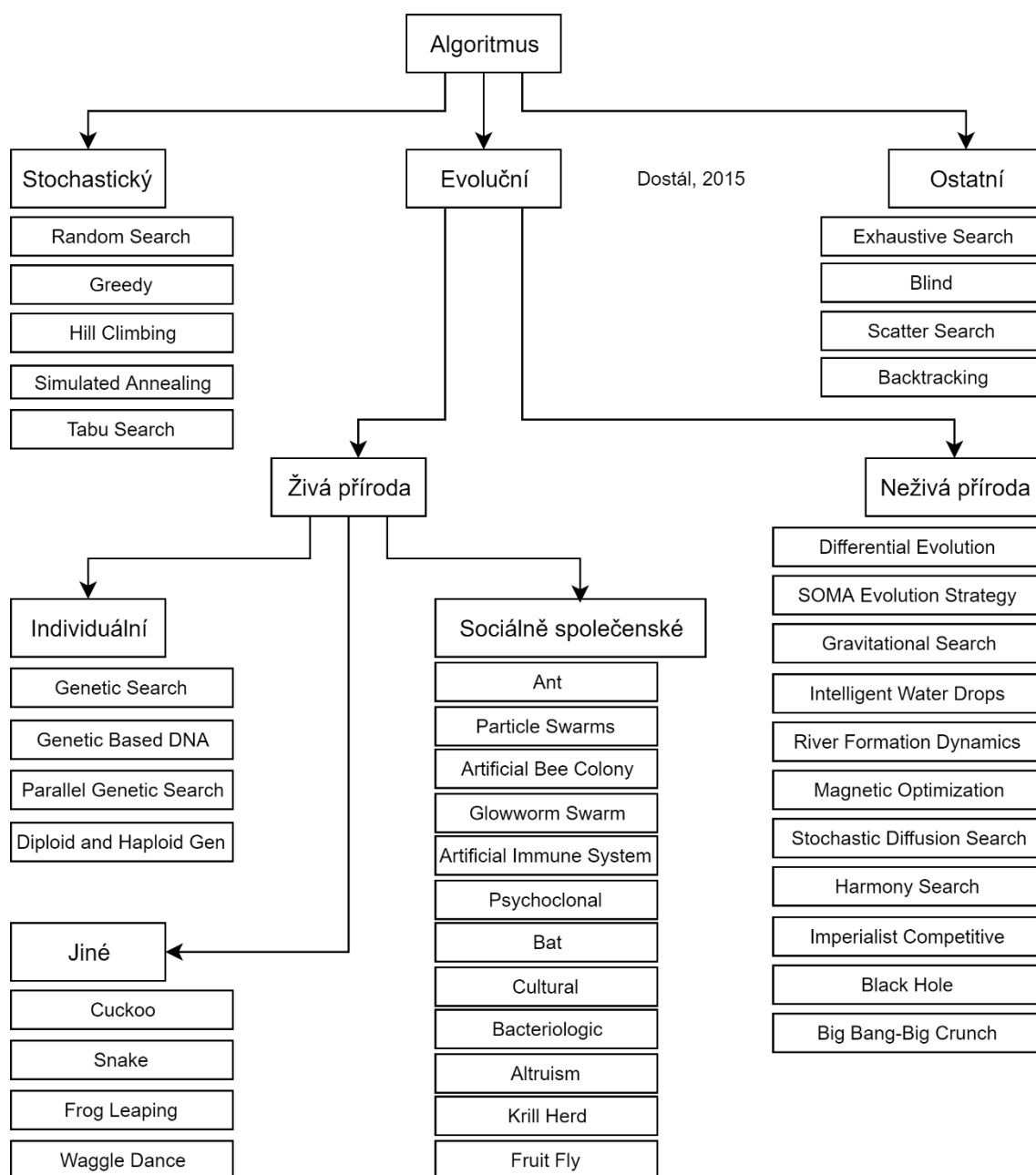


Obr. 4: Rozdělení optimalizačních metod podle [81]  
(Zdroj: [82])



Obr. 5: Rozdělení optimalizačních metod podle [84]  
(Zdroj: [82])



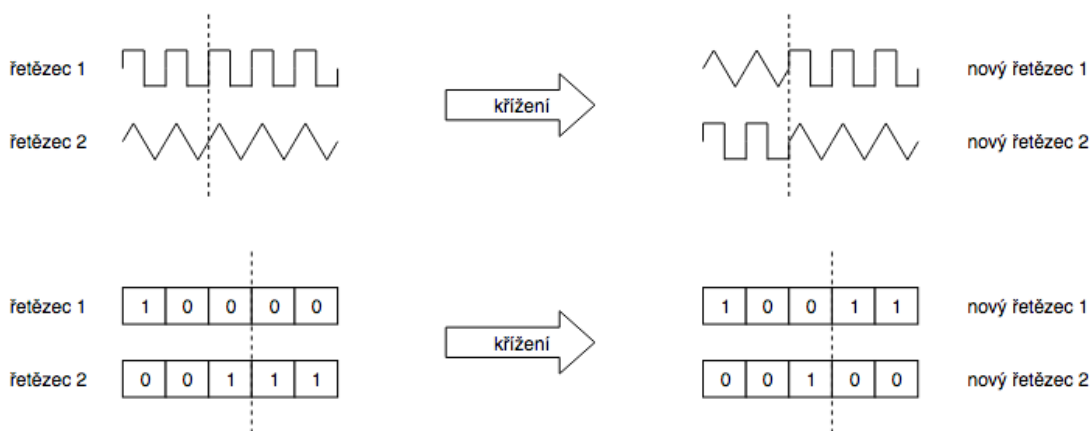


Obr. 6: Rozdělení optimalizačních metod podle [85]  
(Zdroj: [85])

Není cílem kapitoly pojednávat široce o výpočetních evolučních technikách. Aby bylo možné poskytnout výstižnou rešerši relevantní literatury, je třeba co nejvíce zúžit oblast zájmu a soustředit se pouze na výpočetní techniky použité dále v této práci. Hlavní optimalizační algoritmus z kapitoly 10.2 je inspirován teoretickými poznatky z oblasti genetických algoritmů. Kvůli tomu, že jde o problémově specifickou modifikaci genetické transformace populace jedinců, se může objevit námitka správného zařazení algoritmu z kapitoly 10.2, že typově již nejde čistě o genetický algoritmus, ale o nějaký jiný příbuzný typ evoluční výpočetní techniky. Autor v této práci nemá ambice provádět klasifikaci optimalizačních algoritmů, cizích ani vlastních, tudíž otázku zařazení ponechá

na čtenáři. Faktem však je, že původní myšlenka stojící za návrhem vytvořeného algoritmu byla motivována právě teorií genetické transformace.

Genetické algoritmy rozhodně patří ke známějším evolučním optimalizačním technikám, pojednává o nich celá řada autorů v již zmiňované literatuře [79] [85] [82]. Často citovanými pracemi jsou Goldbergova kniha o genetických algoritmech [86], kde jsou tyto stručně definovány jako prohledávací algoritmy založené na mechanismu přírodního výběru a přírodní genetiky. Dále lze zmínit třetí doplněné vydání Michalewiczovy práce [87], kde se autor oproti Golbergovu výkladu teorie zabývá spíše stránkou praktické implementace genetických algoritmů do optimalizačních programů. Původním zdrojem literatury je však Hollandova disertační práce z roku 1975, resp. její pozdější knižní vydání [88].



Obr. 7: Schéma operace křížení v GA  
(Zdroj: [86], doplněno podle [85], vlastní zpracování)

Genetické algoritmy používají tři základní genetické operace – selekci, křížení a mutaci. Těmito třemi operacemi se modifikuje původní náhodně vygenerovaná populace jedinců tak, aby její informační (genetický) obsah směřoval ideálně směrem ke globálnímu optimu prohledávané účelové funkce. Jelikož je však poloha globálního optima dané funkce z principu neznámá, smyslem těchto genetických transformací je prohledávat prostor proměnných a postupnými malými kroky vylepšovat aktuální hodnotu účelové funkce, přičemž je snaha neuváznout v lokálním optimu. Správné pochopení myšlenky přirozené „slepé“ evoluce je zde zcela zásadní. Algoritmus využívající tento princip (nemusí jít nutně jen o genetický algoritmus) funguje nikoliv proto, že by a priori konvergoval k hledanému extrému. Evoluční proces nemá žádné informace o žádaném stavu. Neví, jaká je hledaná optimální hodnota, ani tvar prohledávaného prostoru. V obecnějším smyslu disponuje jedinou, dokonce pouze jednobitovou informací o tom, zda populace jedinců z hlediska metriky účelové funkce zlepšila, nebo nikoliv. Jistě, v konkrétnějších implementacích algoritmu lze míru zlepšení i kvantifikovat a říct, o kolik je potomek lepší než rodič. Nicméně zde zcela určitě neplatí, že by rychlejší konvergence jednoho jedince v jediném kroku byla vždy globálně užitečnější pro evoluci populace jako celku. Naopak, příliš specializovaní jedinci mohou skončit v lokálních extrémech a odsoudit tak celou populaci ke slepé evoluční cestě, nebo jako poddruh

vyhynout a nepředat své geny dalším generacím. Tyto fundamentální principy evoluce rozvíjí vědní obor evoluční biologie, od které se tvůrci algoritmů mohou mnoho přiučit. Jedním z nejvýznamnějších a pravděpodobně nejnámějších představitelů této oblasti je Richard Dawkins, který ve svém celoživotním díle čítajícím několik velmi populárních knih vysvětluje velmi srozumitelným způsobem evoluční principy na obecné úrovni. Kupříkladu jeho Slepý hodinář [89] se stal tradičním pojmem odkazujícím se na absenci inteligence v procesu přírodního výběru. Ten se totiž může někomu jevit sám jako „inteligentní“, případně jako produkt nějaké inteligence. Dawkins však argumentuje, že nikoliv, že zdání inteligence je způsobeno právě drobnými „slepými“ krůčky, díky kterým jsou favorizováni jedinci lepší oproti jedincům horším, což vede k přirozené evoluci směrem, který se vnějšímu pozorovateli zdá jako žádoucí. Faktem však je, že ani tento směr není a priori žádoucí. Žádoucím se stává proto, že jedinci, kteří se jím vydali, měli konkurenční výhodu oproti těm, kteří šli jinou cestou. Díky této konkurenční výhodě nad svými soky zvítězili v přirozeném výběru a přežili. Otázka žádoucnosti je pak zodpovězena pohledem těchto přeživších jedinců ve stylu – „přežili jsme, tedy vydali jsme se správnou cestou“.

Genetické (potažmo evoluční) algoritmy jsou člověkem vytvořenou simulací procesu přírodního výběru. Jejich uplatnění v optimalizaci je pak vázáno nutností definice algoritmovatelné účelové funkce a konečného počtu proměnných, které do této funkce vstupují. Skutečný přírodní výběr není takto svázán, jeho „účelovou funkcí“ je pouze fakt, zda jedinec přežil či nikoliv a vstupujících proměnných je potenciálně nekonečné množství. Genetické algoritmy jsou nicméně užitečným nástrojem, který i přes svoji nedokonalost ve srovnání s předlohou dokáže v mnoha případech poskytnout východisko v jinak neřešitelných nebo obtížně řešitelných problémech.

Ještě jeden významný Dawkinsův koncept je vhodné zmínit, a to jeho sobecký gen ze stejnojmenné knihy [90]. Ten odkazuje ve svém hlavním smyslu k myšlence, že živé objekty obsahující replikovatelnou genetickou informaci jsou pouze nádobou či nosičem, zkrátka nástrojem pro tuto informaci. Ponechme tento význam stranou, i když by si rovněž zasloužil bližší pozastavení, a přesuňme se na vedlejší smysl sobeckého genu, konkrétně Dawkinsovo chápání replikátorů. Dawkins si je totiž vědom, že informace definující jedince nemusí být uložena pouze v tom, čemu říkáme geny. Informace může být uložena v jakékoliv formě či podobě, která se v rámci prostředí bude schopna replikovat. Samotná informace bez nosiče a okolního prostředí replikovatelná není. To platí pro biologii stejně jako informatiku. Informace uložená v DNA si musí nejprve vybudovat organismus, který jí umožní se zreplikovat, a to v ideálním případě nedokonale. Kdyby byla replikace dokonalá, nemohlo by docházet k evoluci. V informatice toto platí rovněž, samotný bitový řetězec se nedokáže replikovat. Potřebuje prostředí, tj. program, který s ním bude manipulovat dle určitých pravidel, tento program poběží na určitém hardware a ten bude napájen nějakou formou energie. Replikátorem pak bude jakákoliv forma informace, který bude schopna využít své okolní prostředí k (opět nedokonalé) replikaci sebe sama. Ještě drobnou poznámku závěrem, zajímavým příkladem replikátoru vymykajícím se z běžně chápaného konceptu replikujícího se

života jsou PrPSc priony – zvláštní forma prionových bílkovin [91]. Nelze o nich hovořit jako o živých objektech, nicméně vykazují všechny znaky toho, jak Dawkins chápe replikátory.

Z řečeného plyne, že i pro genetické algoritmy lze navrhnout libovolnou strukturu genotypu a funkcí s ním manipulujících, netřeba se omezovat pouze na řetězce znaků nebo vektory reálných čísel.

## 2.5 Matematické modely CSPP

Optimalizační problém rozmístění nabíjecích stanic, označovaný jako CSPP, je třeba pevně vymezit zasazením do kontextu ostatních tematicky příbuzných problémů z oblasti elektromobility. Ty zahrnují:

- Problém rozmístění nabíjecích stanic (CSPP); podrobná rešerše literatury dále v této kapitole.
- Problém časování procesu nabíjení; jediné vozidlo, minimalizace nákladů [92] [93] [94].
- Problém kapacity a stability sítě nabíjecích stanic a řízení procesu nabíjení; více vozidel v síti, optimalizace zatížení sítě [92] [95] [96].
- Problém generování, ukládání a distribuce energie [97] [98] [99].

Seznam typů optimalizačních problémů není vyčerpávající, výše uvedené jsou však ty nejčastěji diskutované ve spojitosti s elektromobilitou. V literatuře se objevují studie shrnující současný stav poznání v různých oblastech relevantních k elektromobilitě, viz například [100] [101] [102] [103]. Předkládaná práce se zabývá problémem rozmístění nabíjecích stanic. Následující rešeršní část bude proto relevantní specificky k tomuto tématu. Pilotní přehled existujících modelů byl publikován již dříve [104] [105] [106] a nyní bude systematizován, doplněn a aktualizován.

Před samotnou rešeršní částí je třeba upřesnit vymezení některých pojmů. Pokud se hovoří o problému nabíjecí infrastruktury (pro který je použita zkratka CSPP), pak je myšlen obecný problém reálného světa, kdy před výzkumníkem stojí otázka optimálního rozmístění nabíjecích stanic neurčitého typu v libovolném prostředí, obvykle však silniční síť. Takto vymezený problém nedefinuje, podle jakých kritérií by se mělo optimalizovat, neurčuje omezující podmínky ani aplikační rozsah a zejména nedefinuje formu ani popisnou hloubku. Naopak pojem model (problému CSPP) reprezentuje zpravidla konkrétní systém proměnných, optimalizačních kritérií a omezení, který se vztahuje ke konkrétnímu pojetí problému CSPP, podle toho, jak jej chápe autor modelu. Model navíc zpravidla obsahuje kromě proměnných, optimalizačních kritérií a omezení také konkrétní aplikační rozsah, tj. například určitou geografickou oblast, nějakou podmnožinu vozidel, vymezený časový horizont. Model také definuje formu matematických vztahů a přesně vymezenou popisnou hloubku. Dá se proto tvrdit, že každý dále zmíněný autor ve své práci popisuje unikátní optimalizační model, avšak vztahený vždy k problému CSPP.

Čtenář znalý problematiky může na tomto místě namítnout, že takto explicitní vymezení pojmů problém a model je v disertační práci nemístné, že se jedná o zcela triviální koncept z oboru modelování, a tudíž netřeba se u něj pozastavovat. Zde uvedme, že toto vymezení má svůj pragmatický důvod. Disertační práce je tematicky zaměřena na problém: na CSPP. Toto téma bylo před začátkem doktorského studia autorem deklarováno, institucionálně odsouhlaseno a po celou délku studia autorem dodržováno. Problém CSPP tudíž nebyl předmětem autorova tvůrčího procesu, tímto předmětem byl model problému. Věcný obsah disertační práce tedy pojednává o modelu. K němu lze vznášet námítky, nad ním lze polemizovat ohledně vhodnosti použité metodologie, vstupů modelu, jeho rozsahu, model lze kritizovat z hlediska jeho implementace. Na tento druh námitek může autor smysluplně reagovat, neboť se vztahují k obsahu disertační práce. Na druhou stranu, námítky k okolnostem zvolení problému CSPP vztahující se k samotnému tématu disertační práce nemohou být smysluplně zodpovězeny. Neodkazují se totiž na provedený výzkum, nýbrž směřují vně disertační práce, napadají výchozí předpoklad, totiž že CSPP je dostatečně relevantní a důležitý k tomu, aby byl řešen formou disertační práce. Toto je důvod, proč autor striktně vymezuje, že předkládá pouze optimalizační model zkoumaného problému a v literárních rešerších se zaměřuje pouze na alternativní modely téhož problému.

Jeden z prvních modelů často citovaný pozdějšími autory je Wangův relativně jednoduchý MIP model [107] [108]. Jde o tzv. smíšený celočíselný program, což je název pro skupinu optimalizačních modelů, které se v některých ohledech podobají lineárnímu programu v operační analýze. V rámci MIP by se měly rozlišovat MILP a MINLP, tj. smíšené celočíselné lineární/nelineární programy, tedy konkrétní typy optimalizačních modelů. Často, jak je tomu právě v případě Wangova článku, se však toto rozlišení neprovádí a terminologie MIP a MILP se zaměňuje. Autoři model používají k určení optimálního rozmístění a velikosti souboru nabíjecích stanic v silniční síti čítající řádově desítky uzlů. Tento model obsahuje mnoho zjednodušujících předpokladů, aby bylo možno použít lineární vztahy mezi proměnnými. Jeho výhodou je snadná řešitelnost a srozumitelnost. Podobný model stejné kategorie používá též Chen k určení optimálního rozmístění nabíjecí infrastruktury do oblasti města Seattle ve státě Washington [109]. Rozdíl oproti Wangově modelu [107] [108] je v množství a kvalitě použitých dat. Model rozděluje region do 3700 diskretních oblastí a na základě empiricky zjištěných dat z místních parkovišť simuluje výši poptávky po nabíjení v jednotlivých oblastech. Optimalizace modelu je pak prováděna hierarchicky za účelem snížení výpočetní složitosti. You [110] vychází z Wangova článku a navrhuje MILP, na kterém provádí srovnání různých algoritmů k jeho řešení, včetně algoritmů heuristických. MILP se při řešení CSPP v literatuře objevuje poměrně hojně, kromě uvedených lze zmínit i další autory [111] [112]. Princip optimálního přiřazení nabíjecích stanic do podmnožiny kandidátních uzlů dopravní sítě přesně vystihuje klasický CSPP problém. Smíšenost MILP umožňuje přidat další neceločíselné proměnné, přičemž jeho linearita zajišťuje pochopitelnost a relativně snadnou řešitelnost.

Popisně přesnější MINLP model je též v literatuře používán, i když ne v takovém rozsahu. Pokud je model koncipován jako nelineární, nemá často smysl ho svazovat do metodologického rámce MIP, pokud se nejedná o promyšlený záměr. V jedné práci [113] se používá nelineární vlastnost MINLP k určení optimálního umístění stanice v daném uzlu (stejně jako v MILP), k určení optimálního počtu konektorů v každé stanici a optimálního výkonu každého konektoru. V potaz se bere kromě standardních proměnných jako je dostupnost stanice a čas nabíjení také proměnné náklady na vybudování vyššího počtu konektorů a ztracený nabíjecí čas (dobu, kdy existují volné konektory). Z článku není zcela zřejmé, proč se autoři odkazují na model jako na MINLP. Model opravdu využívá celočíselných i reálných proměnných a obsahuje nelineární vztahy. Nicméně to znamená, že nepatří do žádné zvláštní třídy modelů, která by byla řešitelná speciálním typem optimalizační metody, jak je tomu například u LP nebo MILP. Autoři toto sami konstatují a pro řešení modelu navrhuji genetický algoritmus. Označení MINLP je zde proto poněkud zavádějící, jelikož model neklasifikuje, ale pouze konstatuje jeho dvě vlastnosti: smíšenost proměnných a nelinearitu. K tématu modelů formulovaných jako celočíselné programy se váže tzv. vehicle routing problém (VRP) použitý například ve Worleyho práci [114] jako základ jeho optimalizačního modelu. VRP byl poprvé publikován Dantzigem [115] a je klasickým modelem využívaným k optimalizaci pohybu vozidel v silniční síti reprezentované jako souvislý graf. Jde o problém spadající do celočíselného programování, konkrétně jde o zobecněnou verzi známého problému obchodního cestujícího. Důležitý je z hlediska jeho vztahu k MIP modelům, potažmo modelům pracujícím s grafovou reprezentací silniční sítě.

Za zmínku jistě stojí i výhradně celočíselný model problému [116], kdy nejsou použity binární proměnné, jak tomu často bývá u MIP modelů, ale celočíselné. V této konkrétní aplikaci jde o umístování různých typů nabíjecích stanic do kandidátních lokací. Jediná proměnná tedy zachycuje nejen umístění či neumístění stanice, ale též její typ, resp. výkonnostní třídu.

Poněkud odlišný přístup aplikuje He při svém řešení CSPP [117]. Problém formuluje jako nelineární matematický program s podmínkami komplementarity, přičemž vychází z problému nalezení rovnováhy v dopravní síti (NEP) a k jeho řešení používá active set algoritmus. Model v citované práci je statický, autor nicméně připouští, že jeho rozšíření z hlediska časového vývoje je možné a dokonce žádoucí. Model demonstruje na numerickém příkladu autobusových linek z města Sioux Falls v Jižní Dakotě. Rozsah problému je řádově v desítkách kandidátních uzlů.

Vícekritériální nelineární model je použit při optimalizaci ekonomické výkonnosti elektrifikovaného vozového parku taxislužby [118]. V článku není ke zpracování vícekritériální účelové funkce aplikován standardní postup pomocí Paretovy hranice, autoři používají výpočet celkové hodnoty účelové funkce z hodnot dílčích účelových funkcí pomocí vícekritériálního ordinálního srovnání. K řešení modelu je použito genetického algoritmu. Článek se od ostatních prací zabývajících se CSPP liší zejména povahou procesu nabíjení elektromobilů. Většina autorů analyzuje situaci, kdy volně se pohybující vozidla potřebují dobít interní bateriový balíček z externího zdroje. Tato práce

však uvažuje tzv. battery-swapping nabíjecí mód, což je způsob nabíjení formou výměny vybitého interního bateriového balíčku vozidla za nabitý. To zpravidla významně zkracuje nabíjecí čas a díky možnému použití šetrnějšího nabíjecího módu též živostnost baterií. Jelikož jde o případ jediné firmy mající homogenní vozový park, je tento přístup smysluplně využitelný.

Vícekriteriální model aplikuje též Wang [119], který používá data envelopment analýzu (DEA) v kombinaci s metodou křížové entropie (CE) k získání konečného optimálního řešení. Autoři vycházejí z principu, že je možné jimi používané 3 účelové funkce transformovat do jediné pomocí váženého součtu původních účelových funkcí. Výstupem CE algoritmu je nalezení kandidátních řešení. Následuje zapojení DEA, která z těchto řešení vybere řešení optimální. Autoři si jsou vědomi obtížnosti tvorby objektivní metriky vícekriteriálního problému, proto dodávají ještě podrobnou diskuzi nad tvarem Paretovy množiny.

Další, velmi dobře strukturovaná práce se zabývá problematikou rozmístění stanic na výměnu baterií (BSSPP) [120]. Autoři nabízí poměrně přehledný model, avšak postavený na poněkud odlišném pohledu na problém. BSSPP je pojat z hlediska minimalizace energetických ztrát uvnitř distribuční sítě napojené na distribuované generátory elektrické energie (DG). Nepokrývá tedy explicitně problematiku poptávky uživatelů PEV po nabíjení. Řešení modelu je zajištěno pomocí ABC a PSO algoritmů, přičemž je provedeno srovnání jejich výkonosti. Od většiny ostatních prací se článek odlišuje mimořádně srozumitelnou a detailní částí s numerickým příkladem, kde jsou postupně diskutovány 4 různé modifikace modelu s rostoucí úrovní komplexnosti. Úvodní příklad popisuje situaci, kdy lze optimalizovat pouze umístění stanic. Poslední příklad optimalizuje umístění i velikost BSS a zároveň výkon jednotlivých DG. Tímto způsobem je brilantně demonstrován způsob, jak lze optimalizační modely navrhovat a postupně rozvíjet jejich komplexnost. BSSPP studuje i Nie [121], pro řešení svého poměrně komplikovaného modelu volí analytické řešení. Z toho důvodu je model koncipován jako konvexní pro různé typy nabíjecích stanic.

Velice významnou prací je z hlediska CSPP práce Lamova [112], kde autoři formulují problém rozmístění nabíjecí infrastruktury pro elektromobily jako zvláštní optimalizační problém (v práci používají konkrétně označení EVCSP). Model je založen na reprezentaci pomocí teorie grafů jako neorientovaný graf  $G(V, E)$  tvořený množinou uzlů  $V$  a hran  $E$ . Model pracuje s ohodnocenými hranami. Lze jej klasifikovat opět jako MINLP, avšak autoři připouští řešení mimo jiné i pomocí iterativního MILP. Významným přínosem je důkaz výpočetní složitosti, který říká, že rozhodovací verze takto definovaného modelu spadá do třídy NP-hard. Článek navíc obsahuje několik metod řešení modelu, přičemž je provedeno srovnání jejich výkonosti. Výsledkem je konstatování, že deterministické metody řešení jsou použitelné pouze do rozsahu problému v řádu desítek uzlů sítě (maximální počet uzlů u deterministických metod byl 150). Z toho důvodu jsou heuristické metody řešení pro tento problém mnohem vhodnější. Další zajímavý článek navrhuje použití dynamického přístupu k umístování jednotlivých stanic [122] řeší problematiku pokrytí čínského města Chengdu City

nabíjecími stanicemi. Model předpokládá kruhový tvar takzvané service area, tedy oblasti, kterou je schopna určitá stanice pokrýt dodávkou svých nabíjecích služeb. Nemodifikovaná kruhová service area je však předpoklad použitelný pouze pro husté silniční sítě, jakými jsou například městské ulice. Model pak přiřazuje do jednotlivých míst sítě nové stanice podle toho, kde v síti je nejvyšší poptávka. To zajistí, že nejdříve budou postaveny ty stanice, které uspokojí lokální poptávku nejvyšší měrou, přičemž s postupným přibýváním počtu stanic se bude dodatečné uspokojení poptávky snižovat. Tento princip je v zásadě analogií ekonomického zákona klesajícího mezního užítku. Logické vyústění je přidávat stanice tak dlouho, dokud dodatečný užitek z další stanice nebude roven nebo menší než náklady na zřízení a údržbu stanice. Takovou rovnováhu však autoři v práci neposkytují. Principy obsažené v posledních dvou zmíněných článcích spolu s jedním dalším se staly inspirací pro tvorbu níže navrženého modelu.

Několik zajímavých konceptů představují rovněž autoři v [123]. Poskytují například podrobnou diskuzi na téma dojezdové vzdálenosti vozidla oproti požadované vzdálenosti k dojetí do cíle. Jejich závěry jsou rámcově podobné těm, které nabízejí kapitoly 4.4.3, resp. 6.1 a 6.2 této práce, byť pochopitelně z kapacitních důvodů méně obsáhlé. Dále autoři v citované práci představují svůj optimalizační model využívající grafové reprezentace silniční sítě. Toho jsou však schopni dosáhnout pouze pro demonstrativní příklad fiktivní silniční sítě o 100 uzlech, který používají k numerickému příkladu aplikace svého řešení. Přestože není poskytnut reálný příklad, autoři se snaží vyčíslit náklady na různé úrovně nabíjecí služby. Jde o obdivuhodnou snahu, nicméně uváděné investiční náklady je nutné brát pouze jako velmi hrubé odhady, i když se autoři v tomto ohledu odvolávají na model ze [113].

Z chronologického hlediska můžeme pozorovat určitý vývoj v návrhu optimalizačních modelů CSPP. Modely vytvářené v prvopočátcích masového rozšíření elektromobilů z let 2008 až 2010 měly spíše teoretický základ, autoři sestavovali svoje modely dle domněnek o budoucím stavu oboru. Jejich tvůrčí záměr byl svázán tím, že jednoduše neexistovala data, na kterých by model postavili – elektromobilů bylo na světě ještě velmi málo. Když nebylo možné postavit model kolem dostupných dat, byl kladen důraz na formát modelu, na jeho klasifikaci z hlediska typu. Tak vznikaly modely postavené jako oblíbených a poměrně lehce řešitelných MIP modelech [107] [108] [111] [112], modely postavené jako nelineární verze MIP [112] [113], nebo modely určené spíše k demonstraci exotické metody jejich řešení. Často neexistoval významnější důvod k nutnosti řešit model CSPP pomocí exotické metody řešení [124] [119] [125]. Kolem roku 2017 se však začaly objevovat práce, jejichž charakter se mírně změnil. Jak se stávala data o nabíjecích událostech uživatelů čím dál dostupnější, jak rostlo jejich množství, kvalita i variabilita, začaly se optimalizační modely CSPP stále více soustřeďovat kolem povahy dostupných dat. Z této kategorie můžeme uvést standardní implementaci CSPP v prostředí Itálie [126], řešerši aktuálních nabíjecích technologií z prostředí Španělska [127] nebo [128]. Nutno dodat, že tento posun není nijak převládající. Stále se objevují nově publikované práce využívající poměrně zastaralá data, uveďme [129], kde autoři pracují s dopravním průzkumem z roku 2006, dále [130] s daty



z roku 2009 nebo [131] používající data z roku 2011. Zastaralá data nejsou obvykle problémem v případech, že výzkumným záměrem je teoretický výzkum problému, například vývoj nového typu matematického modelu, který naopak chceme testovat na známých, dříve ověřených datových souborech kvůli jeho evaluaci. Pokud je však výzkumným záměrem odvozování určitých charakteristik o současné situaci, případně predikce těchto charakteristik do blízké budoucnosti, pak by použité datové zdroje měly být co nejaktuálnější.

Tato první ze čtyř podkapitol se snažila zaměřovat na články o CSPP jako celku, přičemž zhodnocování dílčích částí jednotlivých CSPP modelů bylo pod její rozlišovací schopnost. V následujících kapitolách budou adresovány dílčí podoblasti problému CSPP, tedy modely a metody, které je třeba prozkoumat, aby řešerše problematiky byla dostatečně podrobná.

## 2.6 Modely odhadů poptávky po nabíjecí službě

Abstraktní model navržený v [105] pracuje se dvěma veličinami – poptávkou po nabíjecí službě a její nabídkou. V citované práci je rovněž vysvětlen rozdíl v obtížnosti určení těchto veličin. Zatímco určení nabídkové strany je otázkou dostupnosti zejména technických dat v dostatečné kvalitě, strana poptávky vykazuje podstatně komplexnější charakter. Toto téma bylo diskutováno v [132], kde byl navržen rámcový model poptávky po nabíjecí službě. Následující řešerše tematicky příbuzných prací ukáže, že problematika správného odhadu poptávky po nabíjecí službě je téma diskutované a netriviální.

Tuto kapitolu nazvanou *Modely odhadů poptávky po nabíjecí službě* je třeba uvést stručným nastíněním pojmů. *Poptávku po nabíjecí službě* ( $CS_D$ ) lze definovat jako potřebu majitelů PEV dobít interní baterie svých vozidel z externího zdroje elektrické energie, přičemž tento požadavek má především prostorový a časový rozměr. Jinými slovy, jde o potřebu dobít neplnou baterii svého vozidla v určitém místě a čase. Zde je třeba si povšimnout, že v principu nezáleží na způsobu, jakým bude tato potřeba saturována. Samozřejmě, v praxi budou existovat parametry, jejichž určité hodnoty bude poptávající osoba preferovat. Typickým příkladem takového parametru je rychlost saturace potřeby (rychlost dobítí baterie), přičemž poptávající osoba bude zřejmě preferovat vyšší rychlost před nižší.

Modely odhadů poptávky po nabíjecí službě, tedy modely odhadů  $CS_D$ , pak hrají ústřední roli v problematice určení výše  $CS_D$  v konkrétním regionu nebo čase. Jak název zdůrazňuje, jedná se o modely *odhadů*, jelikož přesné určení takové veličiny by vyžadovalo znát přesné preference každého provozovatele PEV relevantní pro každé místo a čas. Tento fakt nicméně striktně vzato vystihuje už termín model (modelování), proto o *modelech odhadů*  $CS_D$  bude často hovořeno pouze jako o *modelech*  $CS_D$ .

V literatuře zabývající se modely  $CS_D$  se objevuje několik vzájemně zaměňovaných termínů, které jsou používány v kontextu veličin určujících její finální hodnotu. Jedná se především o *cestovní chování* (*travelling/driving behavior*), *nabíjecí chování* (*charging*

*behaviour*) a *cestovní vzory (travelling/driving patterns)*, což jsou pojmy často volně zaměňované, avšak, bráno do detailu, znamenající něco jiného.

Cestovní chování je určitý soubor vzorů v chování uživatele vozidla z hlediska jeho pohybu v čase a prostoru chápaný z makro pohledu. Příkladem může být [133] pracující se statistickými daty ze Singapuru [134]. Zjednodušeně jde tedy o to, odkud, kam a kdy se uživatel pohybuje zkoumaným dopravním prostředkem (elektromobilem) na zkoumaném území (ČR). Příkladem konkrétního cestovního chování jedné osoby je pak soubor pravidelnějších cest (z domova do zaměstnání, za zábavou, na nákupy) a nepravidelných cest (na výlet, k lékaři specialistovi, na služební cestu), které budou mít vnitřně nějakou strukturu, tedy nebudou zcela náhodné (můžeme s vysokou pravděpodobností očekávat, že uživatel v rámci svého cestovního chování nevyrazí ve 2 hodiny ráno na 1200 km dlouhou okružní jízdu po květinářstvích v ČR, jestliže nikdy nic podobného neudělal).

Vedle toho stojí nabíjecí chování [135], což je soubor vzorů chování uživatele elektrického vozidla z hlediska uspokojování své nabíjecí potřeby. To znamená, že nabíjecí chování neřeší primárně kde, kdy a jak se dotyčné vozidlo pohybuje, ale kde, kdy a jak se nabíjí. Příkladem nabíjecího chování osoby by pak byl soubor nabíjecích událostí ukotvených v místě a čase vykazující jistou pravidelnost. Příkladem může být následující rozdělení: uživatel nabíjí své vozidlo a) denně doma přes noc – 60 % celkové nabíjecí kapacity, b) částečně pravidelně v nákupních a zábavních střediscích v oblasti – 25 %, a c) nepravidelně v placených garážích a městských pouličních nabíjecích stanicích – 15 %.

Mimo cestovní a nabíjecí chování se můžeme setkat ještě s cestovním, případně nabíjecím vzorem. Vzorec v chování můžeme chápat jako podmnožinu chování. Za vzor budeme považovat jen determinističtější množiny akcí, tedy cestovním vzorem by mohla být pravidelná cesta z domova do zaměstnání začínající každý všední den v určitý čas a probíhající po stále stejné trajektorii. Tu můžeme chápat například jako nejkratší cestu v silniční síti mezi polohou domova a polohou zaměstnání. Nabíjecím vzorem by pak bylo připojení vozidla k nabíjecí stanici v parkovacích prostorách zaměstnavatele kolem deváté hodiny dopoledne. Dalším vzorem může být zapojení vozidla do soukromé nabíjecí stanice ve vlastní garáži po návratu ze zaměstnání v 6 hodin v podvečer. Po objasnění pojmů přistupme k samotné rešerši.

Většina raných prací zabývajících se problematikou určení  $CS_D$  je z prostředí USA [136] [137] [138]. Je tomu tak pravděpodobně proto, že Spojené státy dlouhodobě analyzují velmi kvalitně cestovní chování svých občanů. Výsledky těchto rozsáhlých průzkumů se souhrnně skrývají pod názvem National Household Travel Survey (NHTS) a jsou v plné verzi publikovány americkým ministerstvem dopravy [139]. Podobně kvalitní datové základny jsou podmínkou pro tvorbu dostatečně přesného modelu  $CS_D$ , avšak ne v každé zemi či regionu jsou dostupné. Naštěstí pro ČR, Ministerstvo dopravy ČR, konkrétně Ředitelství silnic a dálnic, data takové povahy sbírá, i když je publikuje v omezené detailní podobě [140].

Například Harris používá právě NHTS data k predikci  $CS_D$  v následujících 10 letech [136]. Jeho studie se zaměřuje především na časovou stránku poptávky z hlediska jediného dne a z hlediska budoucího očekávaného vývoje elektromobility v dané lokalitě (Austin, Texas, USA). Používá metodu Monte Carlo k simulaci nabíjení vozidel uživatelů kategorizovaných do různých profilů. Následně testuje dopad takto obdržené statické poptávky na nabíjecí infrastrukturu z hlediska jejího dynamického růstu v průběhu let. Uvažují se při tom rozdílné odhady budoucího vývoje trhu s elektromobily. Autoři závěrem uvádějí určitá konkrétní doporučení, práce je však hodnotná především z hlediska přístupu k výběru a zpracování dostupných dat. NHTS data používá i Sears, v jehož práci je představen návrh metodologie k simulaci  $CS_D$  [137]. Práce je bohužel poněkud stručná a je v ní uveden pouze hrubý nástin použitých veličin. Autoři v zásadě vychází z počtu registrovaných PEVs, procenta nabíjecích incidentů odehrávajících se ve veřejných nabíjecích stanicích a obecných cestovních vzorů platných pro danou oblast. Klíčové je tedy zaměření na tzv. *away-from-home* nabíjení a záměrné nepoužívání detailních dat jako jsou záznamy z GPS. Výsledkem je pak očekávané poptávané množství stanic a náklady na jejich zřízení.

Literatura z oblasti modelování  $CS_D$  není zdaleka tak tematicky homogenní jako ta z oblasti modelů CSPP. To dokládá i další práce zabývající se otázkou, zda informovanost o dostupné nabíjecí infrastruktuře ovlivňuje zájem uživatelů o elektromobily [141]. Položená výzkumná otázka zdánlivě nesouvisí s modelováním  $CS_D$ , avšak při bližším pohledu je zřejmé, že ve skutečnosti  $CS_D$  zkoumána je, pouze „z druhé strany“. Je racionálním předpokladem se domnívat, že potenciální kupující elektromobilů budou citliví na existenci nabíjecí infrastruktury. V oblastech s neexistující nebo nedostatečnou infrastrukturou by totiž jejich použití elektromobilu bylo omezené, tedy byl by omezen i užitek získaný z jeho nákupu. Tuto skutečnost zmíněná studie explicitně potvrzuje na základě empirického výzkumu. Jenomže implicitně potvrzuje i něco dalšího. Větší ochota pořídit si elektromobil vedoucí k jeho koupi zároveň zvyšuje  $CS_D$ , jelikož takový nový PEV bude provozován a nabíjen. Z toho plyne, že konstrukce nabíjecí infrastruktury nejen saturuje současnou úroveň poptávky, ale též akceleruje její růst, což je poměrně zásadní myšlenka mající konsekvence pro mezičasový růst  $CS_D$ .

Další práce zkoumají  $CS_D$  z pohledu identifikace klíčových proměnných ovlivňujících cestovní vzory a chování uživatelů PEV [142]. Autoři se domnívají, že v procesu přijímání alternativního způsobu dopravy je vedle technologických změn prostředků dopravy nutná také behaviorální změna uživatelů. Tuto změnu lze nejlépe pozorovat při porovnání původních cestovních vzorů majitelů ICEV a nových cestovních vzorů majitelů PEV. Změna musí logicky nastat i v nabíjecím chování. Klasické jednorázové tankování fosilních paliv u čerpacích stanic při vlastnictví ICEV se musí změnit na průběžné dobíjení PEV, kdekoliv to bude možné. Za hlavní faktory ovlivňující tuto proměnu chování považují autoři míru rozšíření PEV, stav nabíjecí infrastruktury, celkovou kvalitu baterií a povahu dostupných pobídkových programů. Z těchto faktorů je pro utváření nových cestovních vzorů a nabíjecího chování nejdůležitější stav nabíjecí infrastruktury a celková kvalita baterií (výkon, životnost, kapacita, cena).

Technicky detailní analýzu cestovních vzorů poskytuje i Speidel, v jehož práci je uvažováno prostředí siliční sítě a parkovišť australského města Perth [143]. Výstupem jeho studie jsou hlavně doporučení k usnadnění procesu zavádění nabíjecí infrastruktury a identifikace místních překážek. Těmi jsou zejména pomalé rozšiřování elektromobilů ve srovnání s jinými vyspělými zeměmi, zneužívání veřejných nabíjecích míst k běžnému parkování, nízká podpora globálně akceptovaných standardů vztahujících se k nabíjecí technologii a nedostatek výzkumu z oblasti dopadu elektromobility na přenosovou soustavu a tzv. koncept *smart grids*. Doporučení se vztahují primárně k nákupu L1 veřejných nabíjecích stanic. Vedle analýzy výhradně cestovních vzorů se objevují práce analyzující naopak výhradně nabíjecí zvyky (*charging habits*). Studii na toto téma poskytuje např. Robinson [144]. Jeho práce zasahuje do dvou rovin. První profiluje uživatele PEV podle povahy, místa a času  $CS_D$ , v druhé rovině pak vyvozuje závěry o jejím dopadu na životní prostředí z hlediska uhlíkové stopy. Oba pohledy jsou vztaženy na oblast severovýchodní Anglie ve Velké Británii. Robinsonova studie poskytuje zejména časové rozložení nabíjecích událostí, na rozdíl od Speidelovy studie [143] poskytující naopak prostorové rozložení výskytu PEV. Z toho důvodu se Robinsonova studie zaměřuje na doporučení týkající se vyrovnání denního rozložení nabíjecích událostí, aby excesivní nabíjení během pracovního dne nezatěžovalo už tak vytíženou přenosovou soustavu.

Další skupina prací by mohla být vymezena výhradní snahou autorů predikovat vývoj  $CS_D$  z hlediska růstu PEV trhu. Byť je tato analýza rovněž časová, podobně jako jiné [142] [144] se vztahuje k odlišnému pojetí času. Jedna kategorie studií bere v potaz krátké cyklické časové období (den, týden) a jejím předmětem výzkumu jsou opakované, tudíž dobře predikovatelné cyklické výkyvy v  $CS_D$ . Ty jsou způsobené denním cyklem lidské aktivity, tedy rozdíly mezi dnem a nocí, pracovní dobou a volnem apod. [142] [144]. Druhá kategorie studií se zaměřuje na dlouhodobý neopakovatelný vývoj  $CS_D$  v rámci roků či desetiletí způsobený růstem obecného zájmu o elektromobilitu [136] [137]. Závěrem lze zmínit práce zabývající se formálními modely pro doplňování alternativních pohonných kapacit postavených na odhadech  $CS_D$  [145], případně relevantní studie zabývající se cestovním chováním rezidentů České republiky [146].

## 2.7 Ekonomické modely

Vedle článků spíše technického rázu z předchozích dvou kapitol je vhodné nyní pojednat o literatuře ekonomičtějšího zaměření. I když většina článků zaměřujících se primárně na optimalizační či predikční aspekty problému bere v určité míře ekonomické aspekty elektromobility v potaz, nebývá toto téma vždy v centru jejich zájmu.

Velmi hodnotná práce z prostředí USA [128] poskytuje vhled do problematiky alternativních scénářů rozvoje tamní nabíjecí infrastruktury. Jde o článek z nedávné doby využívající znalosti poměrů na již několik let rozvinutém trhu. Jak uvádí kapitola 2.1.1, USA byly jednoznačným průkopníkem masové elektromobility a stále jsou významnými světovými hráči na tomto poli. Autoři se v práci zabývají otázkami rentability nabíjecích stanic a vhodností různých jejích typů, které hodnotí z hlediska investičního,

uživatelského i ekologického. Vysoce hodnotné jsou zejména uvedené náklady nabíjecí infrastruktury a technické parametry různých typů stanic. Autoři se opírají o [147].

Ekonomicky zaměřené práce jsou nejčastěji posouzením různých variant business modelů souvisejících s elektromobilitou. Často jde o modely velmi volně definované zkoumající různé hypotetické scénáře. V článku [148] se autoři pokoušejí najít ziskový business model, který bude výhodný pro všechny zainteresované strany, tj. samotného provozovatele, uživatele a veřejný sektor. Článek obsahuje mnoho podnětů, nejzajímavějším zjištěním je pak fakt, že za ziskový model autoři považují ten s velmi pomalými nabíjecími stanicemi (3,7 kW). Z jiných prací však plyne, že uživatelé nejsou pomalému veřejnému nabíjení příliš nakloněni, což může značně ovlivnit předpokládanou poptávku. Autoři operují s hodnotami 2000 až 3000 kWh ročně na jedné stanici, aby bylo dosaženo zisku. To znamená, že předpokládají přibližně 540 až 810 hodin čistého nabíjení ročně. To se sice nezdá příliš, ale autoři bohužel nepracují s reálnou situací u nabíjecí stanice. Předjížděcí vozidlo může při jediné nabíjecí události potřebovat cokoliv mezi řekněme 15 až 80 kWh energie (viz kap. 8.3). To při dané rychlosti nabíjení znamená 4 až 22 hodin a zde vzniká problém. Uživatel vozidla nebude ochoten u komerční stanice čekat ani minimální 4 hodiny na nabití, nehledě na maximálních 22 hodin. Takové čekání je tolerovatelné u domácích stanic, případně u stanic na pracovišti, kde má uživatel možnost 8 a více hodin strávit smysluplně. U komerčních stanic však takové čekání není přímo možné, uživatel zkrátka v dané lokalitě nemá často smysluplné příležitosti vyžití. Odtud plyne, že stanici by uživatel používal jako parkovací místo a neblokoval by stanici přesně jen čas potřebný k nabíjení, ale o mnoho déle, při uvedených časech nabíjení klidně 1 až 2 dny (řekněme 12 až 48 hodin). Reálně by se tedy nabíjecí událost v očekávané délce 4 hodiny mohla protáhnout na událost délky 12 hodin. A uvažujeme-li, že uživatelé jsou ochotni nabíjet auto na komerčních stanicích spíše přes den než v noci, pak by se ze 4 hodinové nabíjecí události stala blokáce nabíjecí stanice na celý den – na 24 hodin. To ovšem znamená, že pro dosažení 540 až 810 hodin čistého nabíjecího času by bylo nutné nabíjet na stanici vozidlo 135 až 210 dní v roce. Pokud znovu uvážíme, že komerční stanice mohou být na mnoha místech využívány spíše ve všední dny než o víkendech, pak vlastně autoři tvrdí, že aby byla stanice zisková, pak musí být vytížena 3 až 5 pracovních dní v každém týdnu. Toto je požadavek sice splnitelný, avšak kladoucí poměrně značné nároky na poptávku po nabíjecí službě na dané stanici – uživatelé musí aktivně sledovat obsazenost stanice a být ochotní na ní nabíjet jakmile se uvolní.

Detailní ekonomický rozbor business modelu poskytuje vládní studie [149] ze státu Washington (USA). Práce je poměrně rozsáhlá a obsahuje značné množství analýz a závěrů. Jedním z hlavních zjištění je záporná čistá současná hodnota u dvou analyzovaných variant rychlých nabíjecích stanic (Level 2 stanice, DC stanice) po dobu živostnosti projektu v délce 10 let. Opět jsou navržena různá opatření, která by negativní ČSH kompenzovala, vedle tradičních vládních pobídek se jedná o pobídky ze strany výrobců elektromobilů, v jejichž zájmu je zvyšovat uživatelský komfort v používání jejich produktů. V závěru hovoří autoři studie mimo jiné o faktu, že mnoho z oblastí státu

Washington je pro uživatele nedostupná z důvodu absence stanic a dojezdové vzdálenosti vozidel. Opět zmiňují zapojení veřejného sektoru, jehož záměrem by měla být nejen plošná podpora investičních záměrů, ale zejména podpora specifických investičních projektů na místech, které nejsou a pravděpodobně nikdy nebudou ziskové, avšak které rozšiřují současnou oblast pokrytí nabíjecí infrastrukturou.

Tato kapitola je kontinuálním pokračováním dvou předchozích. Rozebírá detailněji některé vybrané ekonomicky zaměřené studie, aby dokreslila celkové spektrum modelů. Kapitola zatím nevykresluje celý ekonomický obraz. Detailnější rozbor ekonomických aspektů elektromobility poskytuje závěrečná kapitola 12, kde jsou reflektovány nové poznatky.

## 2.8 Metody řešení modelů CSPP

S každým matematickým optimalizačním modelem problému je neodmyslitelně spojena metoda jeho řešení. Těch bývá zpravidla několik a lze je označit jako kandidátní metody řešení. Jedním z prvních úkolů, které je třeba při optimalizaci modelu vyřešit, je zvolení jedné z kandidátních metod řešení. Tento výběr optimální metody je v literatuře často proveden současně s prezentací modelu proto, aby čtenář získal informace nejen o použití a konstrukci modelu, ale též o optimálním způsobu jeho řešení.

Kritérii, podle kterých by bylo možné metody řešení modelů klasifikovat, je mnoho. Prozatím neexistují studie, které by se zabývaly výhradně klasifikací použitých algoritmů pro řešení modelů CSPP. V některých publikovaných rešerších se však objevuje klasifikace podle typů použitých modelů, resp. algoritmů [100] [101]. Z toho důvodu je možné diskutovat představované metody ve vágním pořadí podle různých typů použitých optimalizačních metod. Nejprve začneme metodami, které by se daly označit podle [83] jako přímé. Tím jsou myšleny takové metody, které při ideální aplikaci skončí po konečném počtu kroků, přičemž naleznou přesnou hodnotu optimálního řešení. Následují metody, které mohou nést například podle [81] označení deterministické. Ty jsou někdy označovány jako konvergentní, popř. iterační a nejsou koncipovány tak, aby se zastavily v konečném čase, ale jejich zastavení je zajištěno předem definovanou tolerancí chyby. Nenaleznou tedy přesnou hodnotu optima, ale jeho velmi dobrou numerickou aproximaci. Tuto vlastnost vymezuje termín numerické. Termín „deterministické“ vymezuje fakt, že algoritmus konverguje vždy stejným způsobem a nachází v oblasti prohledávaného prostoru jediné optimální řešení. V poslední části jsou pak diskutovány numerické heuristické metody [83], kdy pojem „heuristické“ vystihuje odlišnost oproti deterministickým ve vlastnosti nalezení nejlepšího řešení, které však nutně nemusí být současně globálně optimálním řešením. Jde pouze o řešení, které je „nejlepší z nalezených“. Heuristické metody zpravidla obsahují určitou míru náhody, takže prostor proměnných není prohledáván systematicky a úplně. Prostor proměnných však není prohledáván ani zcela náhodně, ale spíše „inteligentně“, tj. ve směru očekávaného globálního optima [85]. Podle alternativního způsobu klasifikace by bylo možno numerické heuristické metody označit též jako deterministicko-stochastické, či smíšené [82].

Podstatným rysem heuristických metod je však synergie deterministického a stochastického přístupu za účelem docílení zmíněné „inteligence“ algoritmu. Pojem „inteligence“ je zde myšlen samozřejmě pouze obrazně, vnitřně se jedná pouze o chytré navržené algoritmy, které lidskou inteligenci doslovně neobsahují.

Závěrem ještě dvě poznámky. Pokud prostor hodnot proměnných není spojitý, ale diskrétní, pak jako metody numerické deterministické budou označeny též takové metody, které prohledávají celý prostor proměnných a nalézají tak jediné, globálně optimální řešení. Takové metody bychom nazvali enumerativní [82]. Klasifikace optimalizačních metod je sice jasná v teoretické koncepci, pokud však dojde na konkrétní optimalizační algoritmy, může být obtížné je jednoznačně charakterizovat. Jak se autoři snaží navrhnout co nejdůmyslnější algoritmus řešení, používají často konceptů z různých typů optimalizačních metod. Takový algoritmus je pak buď hybridem ležícím na pomezí dvou kategorií, nebo je nutné jednoznačně deklarovat rozhodovací kritérium, podle kterého takový algoritmus zařadíme právě do jediné kategorie. Navíc se často stává, že v diskutovaném článku není algoritmus popsán dostatečně podrobně, abychom na základě dostupných informací dokázali rozhodnout o jeho zařazení. Obsahem této kapitoly proto není snaha o striktní kategorizaci metod řešení, kapitola poskytuje pouze přehled těchto metod použitých k řešení CSPP ve vágním sledu podle jejich domnělého typu.

V jednom z prvních článků z problematiky CSPP je navržený MILP model řešen metodou větví a mezi pomocí LINGO solveru [107]. Model je použit na rozmístění stanic v dopravní síti čítající řádově desítky kandidátních lokalit pro umístění stanice. Jde o dostatečně malý rozsah úlohy, aby model byl metodou větví a mezi řešitelný i v relativně nepříznivých případech tvaru prohledávaného stromu [150]. Model musí abstrahovat od některých realistických předpokladů, aby byla splněna jeho lineární forma a byl řešitelný metodou větví a mezi. Autoři závěrem připouští, že pro problémy skutečného světa se metoda větví a mezi spolu s lineárním modelem příliš nehodí z důvodu velkého rozsahu reálných problémů a existence nelinearit. Navrhují proto v dalším výzkumu model reformulovat a nalézt efektivní heuristickou metodu jeho řešení. Na Wangovu práci se odkazuje například Nie [121], který formuluje problém sice jako nelineární, avšak řešitelný analyticky pomocí matematické analýzy. Řešením je počet stanic vycházející analyticky neceločíselně, takže musí dojít na jeho upravení. Následně jsou diskutovány některé speciální případy jako předpoklad nespojitého výkonu nabíjecího terminálu nebo alternativního módu nabíjení.

Důmyslným způsobem je ošetřen omezený rozsah úlohy řešitelné metodou větví a mezi v Chenově článku [109]. Autoři svůj MILP model koncipují tak, aby uvažovaná oblast je rozdělena do tzv. Traffic Analysis Zones (TAZ). Optimalizace je provedena pro každou TAZ zvlášť a výsledky jsou posléze agregovány. Autoři uvádějí, že i když je tento přístup značně efektivní, není použitý GAMS Cplex Solver vhodným nástrojem z důvodu omezené schopnosti alokovat velké matice. Tento software ve spojení s MATLABem a modelování pomocí TAZ používá i González [151]. V jeho práci je však kromě problému

rozmístění stanic diskutováno významně i časové rozložení zátěže nabíjecí infrastruktury během dne a nekonzistence v poptávce po nabíjení v jednotlivých TAZ.

V další práci je CSPP pro účely řešení reformulován [117]. CSPP je zde označován jako public charging station allocation problem (PCSA), přičemž jeho reformulace do podoby matematického programu s podmínkami komplementarity je označena jako MPCC. Řešení modelu je pak postaveno na řešení nalezení rovnováhy v síti (NEP) pomocí metody aktivní množiny (active-set method) implementované v komerčním solveru CONOPT. Autoři nepodávají bližší detaily o procesu optimalizace vlastního modelu, ale odkazují se na analogické použití softwaru CONOPT [152], které obsahuje podstatně více detailů.

Metodu nepodobající se žádné z doposud uvedených používá ve své práci Lin [153]. Jde o takzvaný analytický hierarchický proces (AHP) představený v 80. letech 20. století Saatyem [154] [155]. Jedná se o metodu návrhu a současně i řešení optimalizačního problému používající kombinaci kvantitativních parametrů a kvalitativního rozhodování. V principu jde o vícekriteriální rozhodovací problém, kde základ tvoří matematický model problému, jeho řešení je pak získáno prostřednictvím váhových koeficientů jednotlivých kritérií. Autoři používají k demonstraci fiktivní síť řádově desítek uzlů a docházejí k závěru, že CSPP je modelovatelný a řešitelný pomocí AHP.

Model konstruovaný pro oblast íránského hlavního města [113] je řešen pomocí GA. Autoři neposkytují další informace ohledně použité metody řešení, kromě konstatování, že úloha byla řešena pomocí nějakého druhu GA solveru. V práci zároveň chybí odůvodnění, proč právě tato metoda by měla být pro danou úlohu optimální. Odpověď na tuto otázku poskytuje Lam [112] ve své práci, kde srovnává velice pečlivě rovnou 4 různé optimalizační metody aplikované na navržený model. Ten řeší iterativním MILP prostřednictvím klasického MIP solveru pracujícím s metodou větví a mezí, nebo alternativně pomocí „efektivního“ MILP, kde zavedením reálně splnitelného zjednodušení pročišťuje strukturu prohledávaného grafu. To snižuje dobu výpočtu každé operace, tedy původní iterativní MILP řeší úlohu rychleji. Alternativně k těmto dvěma přímým metodám přidává efektivní greedy algoritmus a heuristickou optimalizační metodu založenou na chemických reakcích (CRO) [124]. Všechny čtyři metody jsou srovnávány z hlediska celkem pěti parametrů, kterými jsou přesnost řešení, výpočetní čas, maximální velikost ještě řešitelného problému, povaha algoritmu a nutné předpokladů k použití metody. Po celkovém srovnání vychází nejlepší metoda CRO, zejména proto, že je velice rychlá (ačkoliv greedy algoritmus je ještě rychlejší), je použitelná i na rozměrné problémy, přesnost výsledku je dostačující (vyšší, než u greedy algoritmu) a její použití není podmíněno žádnými zvláštními předpoklady. Ze srovnání plyne, že přímé metody mají vyšší nárůst výpočetního času s růstem rozsahu úlohy, nejsou použitelné na úlohy velkého rozsahu, avšak dosahují vyšší přesnosti. Naopak CRO a greedy metoda nenalézají globální optimum vždy, ale jsou z hlediska velikosti úlohy mnohem robustnější. Za zmínku stojí rozdíl mezi greedy metodou a CRO ve stabilitě výsledku. Greedy algoritmus vrací podle autorů při každém spuštění úlohy vždy stejné řešení, je tedy v tomto ohledu deterministický, naopak CRO v sobě nese jistou dávku náhody, proto



každé spuštění vrací jiný výsledek. Zde je však nutné doplnit, že chování konvergence greedy algoritmu závisí na výchozím bodě, který autoři zjevně uvažují pouze jediný. Při různých výchozích bodech by se totiž jako nedeterministická mohla jevit i greedy metoda.

Genetické algoritmy jsou použity i v dalších studiích. Například Hess [111] řeší navržený optimalizační model pomocí GA právě z důvodu příliš rychlého růstu výpočetní složitosti přímých metod, konkrétně metody větví a mezí. Jinde je vyvinut hybridní genetický algoritmus (HGA) pro řešení navrženého modelu [110]. Autoři se v práci explicitně zabývají nastavením parametrů algoritmu, zejména kódováním chromosomu a použitými genetickými operacemi. Například z hlediska selekce používají elitismus a ruletový výběr. Navržený HGA srovnávají s klasickým GA solverem ze softwarového balíku GAMS a s přímou metodou větví a mezí ze softwarového balíku LINGO. Toto srovnání provádějí na několika modifikacích optimalizační úlohy. Ze srovnání vyplývá, že navržený HGA je rychlejší než ostatní dvě metody, a i když nenalezne podobně jako klasický GA globálně optimální řešení vždy, je suboptimální řešení dostatečně blízké řešení optimálnímu. Vícekriteriální model řeší Ning pomocí vícekriteriálního genetického algoritmu (MGA) [118]. Genetické operace tato metoda provádí pro každou účelovou funkci odděleně. Popsané řešení uvažuje aritmetické křížení, degresivně se měnící mutaci populace a kritérium zastavení založené na RMSE.

Netradiční heuristiku používá Wang [119], kdy svůj model řeší pomocí metody křížové entropie (CE). Tato metoda funguje tak, že z původní úlohy je vytvořena množina funkcí pravděpodobnostního rozdělení s různými parametry. Algoritmus pak adaptivně upravuje tyto parametry s cílem minimalizovat křížovou entropii, případně rozptyl jednotlivých funkcí pravděpodobnostního rozdělení. Kompozice takto upravených pravděpodobnostních funkcí pak rychle konverguje ke globálnímu optimu problému. CE vyžaduje pouze několik parametrů definovat předem, například velikost populace či procento elitních jedinců, ostatní jsou adaptivně měněny v průběhu optimalizačního procesu. CE vyprodukuje několik kandidátních optimálních řešení vztahujících se k různým účelovým funkcím. Následně použitá DEA vybere absolutní optimum.

Jamianův model je řešen pomocí algoritmu umělé včelí kolonie (ABC), přičemž jej srovnává s analytickým řešením a alternativní heuristikou PSO [120]. Navržený model je koncipován tak, že jeho základní abstraktní verzi lze řešit analyticky. Po zakomponování realističtějších předpokladů je ho nicméně nutno řešit numericky, přičemž velikost úlohy nedovoluje enumerativní řešení. Z toho důvodu autoři navrhují použít algoritmus ABC, jehož výkonnost srovnávají s přesností PSO i s analytickým řešením abstraktně formulovaného modelu. ABC je v práci poměrně detailně popsán, jde o přibližně desetikrokový algoritmus využívající populaci jedinců, jejichž transformační operace simulují chování různě specializovaných včelích jedinců ve včelím společenstvu. Rozlišovány jsou 3 druhy jedinců a to tzv. employed bees, onlooker bees a scout bees, přičemž každá skupina jedinců hraje v algoritmu odlišnou roli. Ze vzájemného srovnání ABC, PSO a analytického řešení plyne, že PSO není schopen dosáhnout dostatečně nízké hodnoty energetických ztrát v síti (veličina účelové funkce) vzhledem k analytickému optimu. V tomto ohledu ABC dosahuje hodnot stejných nebo lepších než

PSO, avšak ve výrazně kratším výpočetním čase. Z těchto důvodů je ABC označen jako optimální, jelikož jeho rychlost, přesnost řešení a tolerance vůči realistické stavbě modelu demonstrují jeho univerzálnost.

PSO používá i Yang, avšak ne v jeho tradiční podobě, nýbrž v modifikované verzi, kterou nazývá Improved PSO [95]. Protože navržený model je nelineární nekonvexní rozsáhlý statický optimalizační model obsahující diskrétní i spojité řídicí proměnné, je potřeba zvolit metodu, která jej zvládne efektivně řešit. Zároveň model obsahuje tradičně množinu omezujících podmínek formulovaných soustavou nerovnic, které rozdělují prostor proměnných na přípustnou a nepřípustnou část. Vylepšení standardního PSO pak spočívá primárně v tom, že nepřípustné kombinace proměnných nejsou uvažovány a nevstupují do další iterace rojení. Je logické, že autoři takto upravenou metodu srovnávají s klasickou PSO metodou, přičemž z hlediska konečné hodnoty účelové funkce i z hlediska rozptylu výsledků získaných opakovaným spuštěním algoritmu, dosahuje IPSO lepších výsledků přibližně o 6 %. Toto zdánlivě malé zlepšení je však třeba vzít do kontextu veličiny účelové funkce, kterou jsou energetické ztráty v síti. Z tohoto pohledu je pak 6 % snížení celkových ztrát dosažené pouhou záměnou optimalizačního algoritmu ekonomicky dosti zajímavé.

Výrazněji upravenou verzi PSO používá i Xu, přičemž vedle binární modifikace přidává spojení s tabu search mechanismem a výslednou metodu označuje jako TM-BPSO [125]. BPSO je binární modifikací metody PSO vhodné pro úlohy s diskrétním prostorem proměnných. Princip tabuizovaného prohledávání je zaveden proto, aby resetoval BPSO v případě, kdy bude chtít skončit v lokálním extrému. Tabu list zajistí, že nějakou dobu se do stejné lokální konvexní oblasti nepůjde pomocí BPSO dostat. Opuštění lokální pozice je provedeno na náhodné místo prostoru proměnných a algoritmus BPSO je spuštěn znovu. Jsou diskutovány různé způsoby plnění tabu listu a případné vnitřní transformace položek tabu listu, stejně jako typ stochastického výběru nového umístění vektoru proměnných v prohledávaném prostoru. Srovnání BPSO s TM-BPSO vychází podle očekávání, přidáním schopnosti vyskočit z lokálního optima dosahuje navržená metoda používající tabu mechanismus lepších výsledků.

Kapitoly 2.5 až 2.8 poskytují přehled odborných prací, z nichž budou čerpány poznatky pro návrh samotného modelu CSPP a pro návrh metody jeho řešení. Model bude navržen jako hierarchicky dekomponovatelný na dílčí submodely, které budou vyvíjeny samostatně, aby ve výsledku mohly být propojeny jako jediný optimalizační model a řešeny vhodnou optimalizační metodou.

## 3 Cíle a přínosy disertační práce

### 3.1 Cíle

Hlavním cílem disertační práce je tvorba dynamického rozšiřitelného optimalizačního modelu problému rozmístění nabíjecí infrastruktury pro elektromobily, návrh metody jeho řešení a demonstrace modelu na případě ČR.

Pro úspěšné splnění hlavního cíle je třeba provést sérii kroků, přičemž výstupy těchto kroků lze označit za dílčí cíle. Jsou jimi:

- Analýza prostředí elektromobility ve světě a v ČR.
- Analýza typů zkoumaných problémů vztahujících se k tématu elektromobility a výběr vhodného tématu.
- Nalezení takového metodologického rámce a jeho nástrojů, který bude zkoumané téma schopen výstižně uchopit, popsat a řešit.
- Stanovení základních proměnných, nalezení požadovaných datových zdrojů, jejich čerpání a zpracování.
- Návrh architektury modelu, návrh jeho dílčích částí, stanovení požadavků na data k jednotlivým částem.
- Návrh metody řešení modelu, měření výkonnosti metody a její optimalizace.
- Demonstrace funkčnosti modelu na reálných datech.
- Poskytnutí dostatečně obsáhlé strukturované diskuze ke každému z analyzovaných podproblémů za účelem zvýšení čitelnosti a pochopitelnosti práce.

Z argumentace z kap. 12 plyne, že smyslem optimalizačního modelu je najít takové rozmístění stanic v průběhu času a prostoru, aby nabíjecí infrastruktura rostla společně s počty provozovaných elektromobilů.

### 3.2 Přínosy

#### 3.2.1 Vědecký

Vědeckým přínosem práce je tvorba optimalizačního modelu CSPP pro prostředí ČR, optimalizace tohoto modelu (postaven jako dílčí modely, ošetření pomalých výpočetní časů), návrh metody řešení tohoto modelu (tvorba CGA, definice genotypu, návrh genetických transformací) a praktická demonstrace modelu na aktuálních reálných datech. Vědecký přínos je reflektován zejm. v kap. 2.5, kde je práce postavena vedle aktuálních odborných článků.

#### 3.2.2 Ekonomický

Model je použitelný pro komerční i veřejnou sféru při jejich snaze o budování nabíjecí infrastruktury v ČR. Ekonomický přínos je diskutován v kap. 2.2 a 4.4, zejména je opřen

o záměr vlády ČR podporovat rozvoj elektromobility, který definuje závazný dokument NAP CM (viz kap. 2.2). Jestliže se libovolná organizace rozhodne pro budování nabíjecí infrastruktury, pak disertační práce poskytuje odpovědi, jak investiční záměr modelovat, jaké informační vstupy použít, jak s nimi naložit a jak nalézt a zvolit definitivní řešení. Takový systém lze označit jako systém pro podporu rozhodování. Práce nejenže poskytuje samotný systém implementovaný v prostředí MATLAB (jde o implementaci demonstrativní, komerční využitelnost v tomto jazyce by mohla být problematická), ale poskytuje především návod, jak takový systém pro podporu rozhodování vytvořit.

### **3.2.3 Pedagogický**

Za pedagogický cíl lze považovat názorný příklad top-down modelovacího postupu na rozsáhlém optimalizačním modelu. Pro výukové účely lze na práci demonstrovat počáteční rozvrh prací a dekompozice problému na dílčí úkoly, viz úvodní článek [105]. Lze ukázat vznik jednotlivých kapitol nejprve jako samostatných vědeckých článků, které byly následně implementovány do komplexního modelu. Je možné ilustrovat detailní řešení dílčích problémů, které se při top-down postupu mohou nečekaně objevit (potřeba transformace systému měření délek – kap. 6.2, zvýšení výpočetního výkonu – kap. 9.5, nahrazení agregovaných odhadů detailní realistickou simulací – kap. 8). Je možné demonstrovat, jak postupovat při vlastním návrhu a implementaci heuristického optimalizačního algoritmu, který vzniká ad hoc z potřeb optimalizačního modelu a je tvořen zcela vlastními silami pouze z teorie o evolučních, resp. genetických algoritmech.

## 4 Metodologie a struktura práce

Kapitola 2 o rešerši literatury identifikovala problémovou situaci a z ní vycházející problém. Rešerše odpovídala na otázky, co a proč je v nestandardním stavu a z jakých důvodů se tento nestandardní stav má řešit. Tato kapitola se pohybuje v takto vymezených hranicích problému a představuje metody a nástroje, jak se tento problém rozhodl autor řešit a co ho vedlo k výběru právě těchto metod. V tomto konstatování je použito Janíčkovu pojetí řešení problému včetně jeho terminologie [2].

Nyní budou představeny metodologické koncepty, na kterých je postavena předkládaná disertační práce. Nejprve bude pojednáno obecně o metodách vědeckého poznání, poté se přesuneme na konkrétní metodologické rámce vztahující se k jednotlivým aspektům práce. I když disertační práci nelze považovat za dílo tak rozsáhlé jako monografii, přesto jde o vědecké dílo spíše většího rozsahu. Obsahové jádro disertační práce je metodologicky ukotveno v dané vědecké disciplíně. Z širšího kontextu je ovšem práce ukotvena volněji než například odborný článek, který obvykle nemá prostor odbíhat k souvisejícím tématům. Jednotlivé metodologické vlivy budou v této kapitole rozebrány a bude představen jejich celkový synergický obraz.

### 4.1 Obecně o metodách vědecké práce

Práci je nutno chápat jako vědecké dílo na pomezí ekonomie a operační analýzy opírající se velmi silně o metody modelování a simulace. Jakožto vědecké dílo musí práce vycházet z metodologie vědecké práce. Není cílem této kapitoly rozebírat obecnou metodologii vědy, k tomu slouží nespočet odborných publikací, např. [2] [156] [157] [158] [159] [160] [161] [162]. Tyto publikace jsou velmi často oborově zaměřené a po úvodním rozboru obecných vědeckých přístupů, který je společný pro většinu z nich, se zaměřují na vědecké metody používané v daném oboru. Lze konstatovat, že většina uvedených publikací je z hlediska kvality obsahu srovnatelná. Z důvodu vyšší konzistentnosti je však vhodné zvolit publikaci jedinou, ideálně tu nejrelevantnější zkoumanému tématu, a použít ji jako referenční metodologický rámec. Touto zvolenou publikací je Molnárova kniha [161] určená zejména pro oblast ekonomiky a managementu, jež chápe metodologii vědy systémovým pohledem a zaobírá se podrobněji metodami modelování, simulace a statistického zpracování dat. Kde bude třeba, tam bude primární Molnárův [161] výklad doplněn rigoróznější Janíčkovou terminologií [2].

Jak pregnantně uvádí Molnár hned v úvodu, při hledání odpovědi na výzkumnou otázku je zpravidla použito kombinace různých vědeckých metod, často bez toho, aniž by si to osoba zkoumající problém aktivně uvědomovala. Metoda vědeckého zkoumání je tvůrčí proces velmi silně závislý jak na zkoumaném problému, tak na osobě vědce. Umění uvažovat určitým způsobem, hledat vysvětlení zkoumaných jevů, definovat vzniklé problémy a navrhnout řešení, jak těmto problémům čelit, je proces natolik nekonkretizovatelný, že dle názoru autora nemá smysl explicitně uvádět formální konstatování, že v „disertační práci byly použity nástroje logické indukce a dedukce“.

Fakt, že tyto nástroje stejně jako další byly použity, je zjevný z autorovy argumentace. Jestliže autor představuje model, pak je zřejmé použití metody modelování. Modelování ovšem implicitně předpokládá použití logických metod, bez kterých by proces modelování nebyl možný. Osoba tvůrce modelu musí být schopna abstrahovat od jednotlivostí při analýze obecných vlastností modelovaného problému a vytvořit z těchto vlastností částečně zjednodušený obraz reality – model. Navíc vědec musí rovněž být schopen konkretizovat závěry plynoucí z vytvořeného modelu aplikací na určitý exemplář zkoumané třídy objektů. Správný návrh modelu vyžaduje umění analýzy při dekompozici problému na lépe uchopitelné dílčí části i umění syntézy při hledání řešení tohoto problému, jež vyvstane v závěru modelování jako sestrojený model.

Molnárem popsaný pozitivistický deduktivní přístup a proti němu postavený konstruktivistický induktivní přístup je oblíbená dvojice, jejíž použití je často deklarováno ve společenských vědách. Všeobecná oblíbenost těchto metod je paradoxní vzhledem k faktu, o jak fundamentálně obtížné a kontroverzní metody se jedná. Verifikovatelnost formulované hypotézy je dramaticky závislá jednak na výkladu samotné formulace, ale také na schopnosti vědce tuto verifikaci účinně provést. Požadavek na verifikaci hypotézy ve skutečnosti není nic snadného, uvážíme-li téměř století starý Popperův argument [163], z něhož plyne principiální neproveditelnost dokonalé verifikace teorie. Před konstruktivismem a z něj dle Molnára vyplývající indukcí [161] naopak varuje Hayek [164] [165] [166]. Přesněji bychom měli říct, že Molnár hovoří o konstruktivismu a schopnosti osoby za pomoci rozumu dojít na základě subjektivních znalostí a zkušeností a pomocí induktivního zobecňování k hledané výsledné pravdě, tj. zkonstruované teorii. Hayek však kritizuje konstruktivistický racionalismus, tedy představu, že objekty nacházející se ve společenské a ekonomické doméně (ekonomika, peníze, právo) byly vědomě zkonstruovány a jako takové by také rozumově konstruovány být měly. I když jde o aspekty mírně rozdílné, mají oba případy společný problém, tak výstižně vyjádřený v Hayekově původní kritice. Tímto problémem jsou omezené schopnosti lidského rozumu pojmut a pochopit předložené informace. Induktivní závěry na základě subjektivních představ lze považovat za platné pouze tehdy, pokud subjektivní představy vědce o zkoumaném problému jsou platné a pokud vědec správně provede induktivní odvození. Ověření platnosti těchto subjektivních představ, stejně jako schopnost induktivního procesu ovšem vyžaduje fundamentální reflexi všech znalostí dané osoby vůči vnějšímu světu a značný trénink. Představa, že pouhé použití induktivní metody v disertační práci zajistí validitu závěrů této práce, je proto zcela mylná.

Přijatelnější chápání dedukce, indukce a jejich vztahu ke vědecké metodě pak popisuje Kolbův cyklus. I zde ovšem platí nikoliv důraz na samotnou indukci a dedukci, ale spíše na schopnost najít důkazy o dopadech formulovaných závěrů v objektivní realitě a zejména pak schopnost modifikovat vlastní subjektivní představy tak, aby byly s realitou konzistentní. Laicky řečeno, je nezbytná schopnost poučit se, kterážto není samozřejmá.

Molnárovo [161] další členění zahrnuje rozdíl mezi aplikovaným a akčním výzkumem a čtyři kvalitativní stupně vědeckého výstupu. Jestliže chceme takto kategorizovat

předloženou práci, pak se jednoznačně jedná o aplikovaný výzkum a výstupy práce se pohybují někde mezi 3. a 4. stupněm, tedy explanací a predikcí. Výstupy popisují zkoumaný systém (interakci elektrických vozidel a nabíjecích stanic v ČR) a odpovídají na otázky ohledně motivace jednotlivých aktérů proč jednají právě takto. Rovněž se práce snaží odpovědět na to, jak se systém bude zřejmě vyvíjet v budoucnu, i když zde s dovětkem, že predikce hluboko do budoucnosti je velmi nepřesná. Práce však poskytuje nástroj (optimalizační model) umožňující opakované relativně přesné krátkodobé predikce tak, jak budou průběžně aktualizována vstupní data.

Po úvodním rozboru standardních vědeckých metod, z nichž některé zde byly výše okomentovány ve vztahu k relevantním tématům, se Molnár [161] zaměřuje detailněji na rozbor metod zahrnující systémový přístup ke zkoumanému problému a z něj logicky vycházející modelování a simulaci. K těmto dvěma skupinám ještě přidává statistické metody jakožto aparát pro zpracování vstupních a výstupních dat modelů a simulací. Jde o členění nadměru relevantní předkládané práci.

Systémová dekompozice problému, jeho vnímání jako potenciálně organizovaného celku, stejně jako schopnost agilního přepínání mezi zaměřením na detail a vnímáním celistvosti – to vše jsou vlastnosti nezbytné pro modelování. Osoba zkoumající problém musí být schopna takového myšlení, aby systematicky přeměnila tento problém, původně vnímaný jako beztvárovou hmotu pojmů a obrazů, na abstraktní objekty a tyto objekty pojmenovala, vymezila a zařadila do struktury, kterou identifikuje buď apriorně, nebo která mu během tohoto procesu takřkajíc „vzniká pod rukama“. Zde opět konstatujeme, že autor považuje nadbytečné při této příležitosti explicitně vymezovat pojmy systémového přístupu. Ty jednak vysvětluje citovaný Molnár, a navíc jsou pravidelným úvodním obsahem oborových kurzů a učebnic.

Zajímavě se Molnár vyjadřuje v kapitole o modelování o rozdílu mezi mentálními a explicitními modely. Za mentální modely považuje jakékoliv souvislejší mentální obrazy reality, skrz které interpretujeme svět. V popisu jejich výhod a nevýhod je zmíněna jejich častá „nesprávnost“. Při bližším pohledu jde o vágní označení. To, zda je model správný či nesprávný ve smyslu schopnosti popisovat realitu, je velmi obtížné rozhodnout a historie je protkána spory mezi epistemologickými filozofickými směry, zda je to vůbec principiálně možné. To, co má však Molnár zřejmě na mysli, jsou časté poruchy v konzistentnosti mentálních modelů, jelikož nejsou nikde uloženy v pevné podobě a není možné je detailně zkoumat a revidovat. Mentální modely lidí jsou často „nesprávné“ proto, že obsahují logický rozpor, který ovšem dotyčný člověk nevidí. Schopnost odhalit tento logický rozpor ve vlastních mentálních modelech je vzácná a vyžaduje značný trénink pomocí interpersonální, případně intrapersonální rozumové argumentace a empirické reflexe. Možné nedostatky osoby modelovat realitu a subjektivitu ve smyslu přenositelnosti modelu na vnější svět nebo jinou osobu konstatuje i Janíček [2].

Explicitní modely [161] mají naopak tu výhodu, že jsou pevné, někde uložené (dnes velmi často v ICT) a lze je detailně zkoumat a upravovat. Janíček tyto modely označuje jako výpočtové [2] a uvádí podrobně jejich typologii, charakterizaci a aplikaci. Nevýhodou

tohoto typu modelů je naopak omezená schopnost zachycení reality, jelikož ze své podstaty pracují jen s explicitními znalostmi dle Nonakova třídění [167]. Předložená práce silně využívá explicitních (výpočtových) modelů a modelování je zde dominantní metodou.

Ještě úžeji je s ICT propojena metoda diskrétní simulace Molnárem rozebíraná dále. Ten chápe diskrétní simulaci zejména ve vztahu k souboru samostatných entit interagujících mezi sebou a s okolím, které nazývá agenti. Aby tyto diskrétní entity mohly být považovány na agenty, musí mít několik vlastností jako kooperace, inteligence, cílevědomost apod. Simulační systém zahrnující plnohodnotné agenty v práci představen není. Simulátor nabíjení, o kterém pojednává kapitola 8, je simulací v širším smyslu. Diskrétní objekty v simulaci nejsou agenty dle Molnárova vymezení. Jde spíše o hromadně generované výsledky akcí, které by s největší pravděpodobností prováděli agenti, kdyby v simulaci skutečně existovali. Jde tedy o jakési přeskočení implementace multiagentního systému a namísto toho je simulace chápána jako aproximace chování takového multiagentního systému. Důvod, proč kapitola neobsahuje pravý multiagentní systém s plnohodnotnými interagujícími agenty představující jednotlivé uživatele elektromobilů, je ten, že informační požadavky na takový systém jsou o mnoho řádů vyšší než na systém navržený. Tyto zvýšené požadavky souvisí zejména s faktem, že pro tvorbu agentů by bylo nutné věrohodně definovat také to, co agenti dělají „mimo“ zkoumaný výsek zájmu – u nabíjecí stanice. Jestliže chápeme agenty jako určitou populaci persistentních entit a tyto entity existují nezávisle na hledáčku pozorovatele, pak musí tyto entity v oblasti mimo zájem pozorovatele mít definovanou nějakou činnost reprezentující jejich existenci. To by vyžadovalo simulovat nejen to, jak se chovají uživatelé elektromobilů v době, kdy využívají služby určité nabíjecí stanice a pozorovatel je na ně zaměřen, ale také poté, co stanicí opustí. To je ovšem úkol z kategorie simulace plnohodnotné sociální interakce nezávislých, svobodně se rozhodujících lidských jedinců, což je problém při současném stavu poznání naprosto neřešitelný. Z toho důvodu jsou entity v navrženém simulátoru zjednodušené a představují jakési „agenty“, kteří ovšem podle definovaných pravidel vznikají při vstupu do hledáčku pozorovatele a podle jiných pravidel zanikají při výstupu z tohoto hledáčku. Interakce mezi nimi je omezená, tyto entity interagují zejména se statickým prvkem prostředí – určitou nabíjecí stanicí. Uvedené vysvětlení chápání pojmu simulace bylo vhodné zmínit proto, aby při výkladu kapitoly 8 nenabyl čtenář mylného dojmu, že jde o popis multiagentního systému. Mnohem blíže má navržený simulátor k modelu hromadné obsluhy.

Nyní se přesuňme od obecných rozprav o metodologii vědy ke konkrétnějšímu představení idejí a metodologie, ze kterých disertační práce přímo vychází. V samostatných podkapitolách se nejdříve zaměříme na obecnější ideje formulující kontext práce a její použití, poté se věnujme metodologii použité pro centrální obsahové jádro práce.



## 4.2 Širší kontext a použití optimalizačního modelu

V rámci rešerše literárních zdrojů je elektromobilita představena jako klíčové téma počátku 21. století. Toto téma je autorem uchopeno z hlediska lokální relevance, tedy globální téma elektromobility je zúženo na národní otázku elektromobility v ČR. Dále, obecné pojetí elektromobility je redefinováno jako problém potenciálního nedostatku nabíjecí infrastruktury na území ČR, přičemž fakt, že nedostatečná nabíjecí infrastruktura je zásadním faktorem bránícím masovému využívání elektromobilů širokou veřejností, je podpořen aktuální odbornou literaturou. Závěrem těchto úvah je, že jestliže se společnost, či jednotlivci rozhodnou, že rozvoj elektromobility je žádaný, pak musí dojít k rozvoji nabíjecí infrastruktury. Zde by čtenář mohl nabýt dojmu, že autor navrhl model rozmísťování nabíjecí infrastruktury proto, aby byl tento rozvoj jednotně řízený. Nikoliv. Autor předkládá nástroj pro podporu rozhodování, modelovací nástroj poskytující informace a nástroj umožňující systematicky kombinovat různé skutečnosti, informační zdroje a z nich vyvozovat informačně hodnotné závěry. Uživatelem modelu nemusí být nutně centrální autorita. Několik následujících odstavců krátce pojednává o důvodech, které vedly autora ke zvolení právě tohoto způsobu pojetí tématu elektromobility. Tyto odstavce jsou psány ve stejném vztahu k probírané tématice, v jakém Molnár [161, s. 115] ospravedlňuje použití multiagentních systémů odkazem na argumenty rakouské ekonomické školy.

Jak bylo zmíněno, vymezené téma bylo uchopeno prostřednictvím formulace, konstrukce a návržení řešení modelu výstavby podpůrné infrastruktury pro elektromobily. Taková infrastruktura však není volným statkem a k její výstavbě je třeba alokace vzácných ekonomických zdrojů. Z toho důvodu by mělo být snahou čerpat tyto zdroje efektivně, z určitého úhlu pohledu optimálně. Zde vidíme, že problém infrastruktury pro elektromobily je žádoucí postavit jako problém optimální alokace vzácných zdrojů. Na ten existují historicky dva filozofické pohledy.

Prvním z nich je pohled konstruktivistický, mající za to, že alokace zdrojů by měla být prováděna globálně *racionálně*, tedy rozumově, tzn. měla by být globálně určena a řízena lidským rozumem. Tím je myšleno, že by měl být vědomě zkonstruován určitý řád či model, který by relevantní vzácné zdroje alokoval pro optimální účely a v optimálním množství. Pokud by taková alokace měla být globálně optimální, pak by tento systém musel uvažovat veškeré globálně potenciální způsoby vynaložení těchto zdrojů. Extrémním ideově ryzím případem takového systému v ekonomickém pojetí by byla centrálně plánovaná ekonomika (i když z historie víme, že ryzího stavu definovaného její ideou nikde a nikdy patrně nedosáhla). V obecném pojetí lze takový konstruktivistický systém či řád nazývat dle Hayekovy terminologie *taxis* [164].

Druhým filozofickým pohledem je pohled emergenistický či spontánní mající za to, že alokace zdrojů by měla být prováděna lokálně *racionálně*, rovněž rozumově, ale nyní chápána pouze jako individuálně racionální, vztažená k jednotlivci, který disponuje uvažovanými vzácnými zdroji a určitým souborem informací. Tento jedinec hledá cesty, jak nejlépe alokovat své vzácné zdroje. Uvedený pohled postuluje, že takto konající

jedinec a všichni ostatní jemu podobní budou své zdroje alokovat subjektivně optimálně, což vyústí v dosažení takového stavu, jež bychom mohli označit za globálně optimální. O tomto stavu bychom řekli, že nastane v momentě, kdy každý z participujících jedinců nebude chtít realokovat své vzácné zdroje. Tato vlastnost systému, kdy globální alokační optimum vzniká samovolně bez designu lidského myšlení je vysvětlováno růstem komplexity systému a spontánní emergencí nezamýšlených vlastností. Na tomto pohledu byla založena myšlenka ekonomie od dob A. Smithe, či ještě dříve W. Pettyho, J. Locka či D. Huma [168] a jde o centrální pilíř všech oponentů centrálního plánování či mírnějšího intervencionismu. Ani zde patrně nenajdeme historický příklad, kdy by se tato opačná idea implementovala v plné dokonalosti. I v řadách jejích proponentů je obtížné najít plnou názorovou shodu o její podobě. Příklady konkrétních ekonomických směrů stojících na této ideji by mohl být například *laissez faire* či klasický ekonomický liberalismus, dnes kvůli matení pojmů raději přejmenovaný na *libertarianismus*. Bez ohledu na konkrétní manifestaci této ideje je v ní vyzdvihován spontánní řád jako protiváha k pojmu *taxis* a jako taková je Hayekem označována jako *cosmos* [164].

Na prezentaci těchto dvou pohledů lze krásně demonstrovat dvě věci. První z nich se vztahuje se k rozdílu v pojetí *rationality*. Druhá se pak přímo vztahuje k úvodnímu problému odůvodnění výběru formy řešení alokace vzácných zdrojů.

Ať už totiž hledíme na problém racionálně konstruktivisticky, či klasicky liberálně, jeho řešení prostřednictvím tvorby matematického optimalizačního modelu je obhajitelné v obou přístupech. Zastánce konstruktivismu dá model jako nástroj do rukou centrální autoritě, například státu, a bude budování nabíjecí infrastruktury řídit centralizovaně. Zastánce spontánního řádu dá model do rukou jednotlivcům, například soukromých investorů, a ti ho budou používat k vlastní maximalizaci zisku tím, že jim model umožní lépe zpracovávat existující roztržštěné informace, což jim poslouží jako konkurenční výhoda. Přirozeně je možná i kombinace, kdy do nezávislého jednání soukromých investorů zasahuje centrální autorita, aby obsluhovala podnikatelsky nezajímavé, avšak společensky žádoucí segmenty trhu. Všechny tyto tři scénáře je model v současném pojetí schopný zvládnout. Princip graduální složitosti mu umožňuje libovolně abstrahovat či konkretizovat podle toho, k jakému účelu bude používán.

### 4.3 Obsahové jádro práce – optimalizační problém

V kapitole 4.1 jsou předloženy důvody, proč je vhodnější zvolit přesné explicitní modely před modely mentálními. Zde bude vysvětleno, jak přesně tyto explicitní modely chápat a jakou přesnou formu budou mít. Do tohoto bodu v argumentaci totiž nemusí být čtenáři zřejmé, že pro vymezený problém by se sice zdánlivě dalo použít více rovnocenných metodologických konceptů, avšak z hlediska způsobu, jakým byl problém vymezen, je nejvhodnější použít metodologii operačního výzkumu.

Problém diskutovaný výše je v tomto bodě stále chápán jako problém rozmístění nabíjecí infrastruktury na území ČR. Z takovéto formulace je tedy zřejmé, že problém bude vyřešen, jestliže se nalezne takové rozmístění nabíjecí infrastruktury na daném území,

kteřé bude v nějakém určitém smyslu označeno za ideální. Odtud stačí udělat jen velmi malý argumentační krok, abychom řekli, že problém nalezení takového ideálního rozmístění je problémem optimalizačním [2] [85].

Pokud deklarovaný problém označíme za optimalizační, pak se výběr metodologie podstatně zužuje. Jestliže navíc konstatujeme, že celý problém je chápán z ekonomického pohledu, pak zbývá zhodnotit optimalizační metody platné pro modelování ekonomických situací. V základních kurzech ekonomické teorie se učí některá vybraná témata, která ekonomická teorie chápe jako problémy optimalizační a pro které má historicky ustanovený aparát jejich řešení. Zde se mají na mysli například úlohy o rozhodování spotřebitele, či úlohy o rozhodování výrobního výstupu podniku [169]. Záměrně jsou tyto „problémy“ označovány jako úlohy, jelikož dle Janíčkovy terminologie [2] je jejich povaha spíše rutinního rázu, protože existuje podkladová teorie přesně definující způsob jejich modelování a řešení, čímž v podstatě determinuje jejich výsledek.

Při bližším pohledu zjistíme, že takto chápané optimalizační úlohy jsou podmnožinou problémů v ekonomii, jejichž řešením se zabývá disciplína operační výzkum (operační analýza). Záběr této disciplíny je široký a některé zdroje mohou tento pojem ztotožňovat s pojmem matematické modelování. Výstižná je v tomto ohledu Jablonského definice [170], která chápe matematické modelování jako základní nástroj operačního výzkumu. Jablonského matematické modelování je tedy podmnožinou Molnářova explicitního modelování [161], případně by se dalo chápat jako oborově specifikované Janíčkovy výpočetní modelování [2]. Operační výzkum je pak vědecká disciplína postavená na tomto pojetí modelování. V konkrétních aplikacích se autoři obvykle již nezabývají tímto striktním vymezením, hovoří pouze o optimalizačních modelech problémů či optimalizaci [79] [85] [171].

Metodologie operačního výzkumu je značně systematická, relativně přímočará a lze ji výstižně zachytit diagramem nebo sledem po sobě jdoucích kroků. Toho mnozí autoři využívají [170] [80], zde bude uveden výstižný Hillierův postup modelování [80]:

- 1) Definuji problém a zajisti si data.
- 2) Formuluj matematický model reprezentující problém.
- 3) Vytvoř počítačovou proceduru k řešení modelu problému.
- 4) Otestuj model a uprav jej v případě potřeby.
- 5) Připrav se na nadcházející aplikaci modelu a jeho výsledků.
- 6) Implementuj změny.

Hillier tyto fáze chápe jako vzájemně se překrývající [80], Jablonský je chápe jako cyklicky se opakující [170]. V každém případě je tento postup centrálním metodologickým nástrojem, podle kterého se autor práce řídil. Každý z těchto kroků odkazuje na nesmírně komplexní soubor podproblémů. Jejich řešení je obsahovou náplní této práce.

Při této příležitosti je ještě nutno podotknout, že předkládaná práce nepokrývá všechny Hillierovy metodologické body. Jelikož jde o práci pilotní, akademickou, pro anonymního příjemce, nebylo možné v jejím rámci obsáhnout i body 5 a 6, tedy praktickou implementaci jejích závěrů. Níže představený výstup práce je tedy nutné chápat jako výstup metodologického bodu ad 4, jedná se tedy o optimalizační model včetně metody jeho řešení, jehož závěry mohou být následně implementovány libovolným způsobem. Zcela konkrétním, „fyzickým“ výstupem práce je tedy počítačový program – skupina vzájemně provázaných funkcí psaných v jazyce softwaru MATLAB, přičemž rovnocenně důležitou součástí je v této práci obsažená dokumentace k tomuto programu. Program spolu s touto dokumentací je pak autorem označován jako optimalizační model.

## **4.4 Představení modelu**

V procesu tvorby modelu byla metodologie ještě více konkretizována na základě tří významných oborových článků. Tento upravený metodologický základ pak byl publikován spolu s definicí modelu problému optimálního rozmístění nabíjecí infrastruktury pro elektromobily (CSPP) v pilotním článku [105]. Metodologie se zde opírá o níže vysvětlené tři zdroje inspirace, chápání interakce mezi centrálními entitami zájmu jako vztah poptávky a nabídky, a speciálně vytvořený koncept tzv. service area. Tyto zdroje inspirace jsou autorem chápány jako v oboru již dříve použité klíčové atributy, které by měl jím navrhovaný model rovněž mít.

### **4.4.1 Tři zdroje inspirace**

Práce je podepřena třemi klíčovými myšlenkami – pilíři vycházejícími z odborné literatury. Prvním pilířem je princip formulace modelu pomocí matematické teorie grafů. Tato forma se inspirovala Lamovou prací [112], kde autoři používají souvislý neorientovaný hranově ohodnocený graf jako nástroj popisu topologie uvažované silniční sítě, kam jejich verzi CSPP umisťují. Grafová reprezentace prostoru má oproti konkurenčním popisům (například euklidovským prostorem) nespornou výhodu v realističnosti a přesnosti. Moderní osobní automobily se pohybují pouze po existujících silnicích. Pokud se chce uživatel vozidla transportovat z místa A do místa B za pomoci automobilu, pak musí tuto cestu vykonat prostřednictvím sítě silnic. Nemůže na rozdíl např. od přepravy letecké použít přímý směr, „vzdušnou čarou“. Pro simulaci tohoto druhu omezení se výjimečně dobře hodí právě matematický graf, jelikož silniční síť je prakticky grafem s křižovatkami jako uzly grafu, silnicemi jako hranami grafu a délkami silnic jako ohodnocením hran.

Tato úvodní metodologická myšlenka byla v počátečních teoretických úvahách zachována, v praktické implementaci počítačového modelu však musela být opuštěna z důvodu vysoké výpočetní náročnosti a implementačních komplikací. Detaily poskytuje kapitola 6 a zejména pak kapitola 6.1.

Druhým pilířem je uchopení vývoje nabíjecí infrastruktury jako dynamického procesu. Inspiraci na toto téma poskytuje [122], který navrhuje nabíjecí stanice rozmísťovat postupně v čase, ne všechny v jeden moment. Dynamický proces je z tohoto pohledu iterativním rozmísťováním částí stanic, dokud nejsou všechny uvažované stanice umístěny, kdežto statický proces je jednorázové umístění všech stanic. Dynamický proces byl zvolen zejména pro svou realističnost (v realitě nelze vybudovat projekt tohoto typu v jediném okamžiku) a adaptabilitu (do každé iterace lze zakomponovat aktuální hodnoty v čase se měnících parametrů).

Tento metodologický koncept se v práci zachoval plně a projevuje se zejména v podobě optimalizačního modelu z kapitoly 9 a jeho vztahu k časovému rozlišení.

Třetím pilířem je postupná výstavba modelu principem rostoucí komplexity použitá například Jamianem [120]. To logicky ústí v návrh softwaru tzv. shora dolů. Při prvotním návrhu modelu nemusí být zcela zřejmá hloubka podrobností, s jakou bude model při svém použití pracovat. Model je proto třeba sestavovat tak, aby umožňoval měnit hloubku popisu podle potřeb nebo dostupné kvality dat.

Poslední z těchto metodologických konceptů se projevuje na výsledku tak, že optimalizační model je složen z dílčích modelů (kapitoly 6 až 10), které jsou opět složeny z dílčích částí, přičemž vše do sebe v celkovém obrazu zapadá a navenek se chová jako jediný optimalizační model. Uživatel může libovolně dílčí modely upravovat a například tak zvyšovat jejich přesnost a aktuálnost. Rovněž se tento metodologický koncept projevil v relevantní publikační činnosti autora, jehož články se postupně zabývaly dílčími modely.

#### 4.4.2 Dvě strany modelu

Tři výše uvedené pilíře jsou inspirací celého modelu. Ten pracuje se dvěma veličinami, jejichž označení je inspirováno ekonomickou teorií: poptávka a nabídka. Obě tyto veličiny včetně jejich interakce jsou předmětem analýzy a modelování. Veličiny jsou však chápány komplexně a mají podobu samostatných modelů, jež se snaží zachytit jejich podstatu. To platí i pro jejich vzájemnou interakci.

Poptávkou ( $D$ ) se v obecné rovině rozumí potřeba uživatelů PEV dobíjet baterie svých vozidel při svých cestách. Nabídkou ( $S$ ) je myšlena schopnost poskytnout službu doplnění prázdně kapacity baterie PEV.  $D$  a  $S$  spolu interagují v reálném prostředí, v čase a prostoru. Prostorově se interakce odehrává v rámci silniční sítě reprezentované grafem  $G(V, E, W)$ , kde  $V$  je konečnou množinou uzlů grafu (vrcholů),  $E$  je konečnou množinou hran grafu a  $W: E \rightarrow \mathbb{R}$  jsou délky každé hrany z  $E$ . Nabídku, poptávku a jejich interakci ovlivňuje množství faktorů. Aby bylo možné smysluplně přistoupit k jejich popisu, je práce systematicky rozdělena do kapitol podle dílčích modelů. V těchto kapitolách bude postupně provedena dekompozice prozatím vágně definovaných proměnných, jejich vymezení, interakce a kontext.

Než však výklad postoupí k popisu jednotlivých modelů, uveďme zde kapitolu definující koncept, bez kterého se v dalším výkladu neobejdeme. Jedná se o pojem tzv. service area, který byl definován již v [106] a který prostupuje celou práci. Kapitola definující service area stojí poněkud stranou hlavního argumentačního proudu. Je artefaktem částečně opuštěných úvah, viz kapitola 6.1, nicméně koncept, který definuje (tj. service area), je pro práci zcela zásadní. Z těchto důvodů pro ni bylo kompozičně vybráno místo hned v úvodu práce, aby čtenáři poskytla základní představu o tomto konceptu, i když operuje s pojmy, které budou čtenáři plně objasněny až později.

#### 4.4.3 Service area

Pohyb v silniční síti nevyhnutelně determinuje omezená dojezdová vzdálenost vozidla. Ta je často považována na hlavní limitující faktor. Různé typy vozidla mají různý dojezd. Omezující podmínka dojezdové vzdálenosti musí být nastavena tak, aby ji splňovala všechna vozidla (zde existuje jistá tolerance ve slově „všechna“, v reálném prostředí je možné vynechat nějakou zanedbatelně malou skupinu vozidel s extrémně malým dojezdem, jelikož její zahrnutí do omezení by vedlo k nepřiměřeně vysokým nákladům). Taková podmínka pro hodnotu dojezdové vzdálenosti  $R$  bude rovna dojezdové vzdálenosti běžně rozšířeného vozidla s nejnižším dojezdem. Platí tedy, že pokud dojezdová vzdálenost všech vozidel je větší než  $R$ , pak jednotlivé nabíjecí stanice od sebe musí být ve vzdálenosti menší než  $R$ , aby bylo možné dostat se od jedné stanice k další. Jenomže tato podmínka není dostatečně silná, aby zajistila bezproblémový pohyb vozidel v silniční síti pokryté sítí stanic.

K demonstraci tohoto posledního tvrzení je třeba zavést pojem tzv. *service area* (SA). V běžné angličtině jde o termín dvojího významu [172] v posledních letech používaný v souvislosti s elektromobilitou [122]. SA je obecně oblast kolem určitého pevného bodu poskytujícího nějakou službu, například službu nabíjení pro elektromobily, přičemž platí, že odkudkoliv z této oblasti je bod poskytující službu dosažitelný. Českým ekvivalentem tohoto termínu by mohly být například „oblast dostupnosti“ nebo „rádius služby“. Ty jsou buď poněkud krkolomné, nebo málo používané, z toho důvodu bude termín používán v jeho anglickém originále. Příkladem může být radiostanice vysílající radiový signál, její SA je potom oblast kolem stanice, ze které je tento signál zachytitelný (například radiopřijímačem osobního automobilu). U nabíjecí stanice je situace obdobná, i když poněkud komplikovanější. V případě radiostanice je SA vymezena maximálním dosahem signálu, přičemž pohybem (radiopřijímače automobilu) uvnitř SA se objem signálu nespotebovává, signál (služba) je dostupný v každém bodě SA, není třeba ho doplňovat. To zřejmě neplatí u nabíjecích stanic, služba je dostupná pouze v centru SA – v nabíjecí stanici. SA pak vytyčuje oblast, ve které lze vozidlem libovolně cestovat, avšak pouze do té chvíle, než je dosažena kritická vzdálenost mezi aktuální polohou vozidla a nabíjecí stanicí z pohledu zbývající kapacity baterie. Tato zatím poněkud nesrozumitelná formulace bude vysvětlena níže.

Uvažujme silniční síť reprezentovanou jako  $G(V, E, W)$ . Označme  $v_s \in V$  uzel grafu, ve kterém je umístěna nabíjecí stanice. Označme  $sp(v_i, v_j)$ , kde  $v_i, v_j \in V$ , jako délku

nejkratší cesty mezi libovolnými dvěma uzly. Uvažme  $R$  jako dojezdovou vzdálenost vozidla při plné kapacitě baterie. Zároveň zavedme  $\mu$  jako minimální kapacitu baterie vyjádřené v dojezdové vzdálenosti, kterou budou ochotni uživatelé vozidla tolerovat z důvodu své *range anxiety* [173]. A konečně, definujme  $L = \{v_v\}$ , kde  $v_v$  je „pohyblivý“ uzel grafu reprezentující vždy aktuální polohu daného vozidla.  $v_v \notin V$ , pokud  $\forall v_i \in V: v_i \neq v_v$ . Jinými slovy,  $v_v$  je roven nějakému uzlu z  $V$  pouze tehdy, pokud se vozidlo nachází přesně na nějaké křižovatce nebo jiném definovaném bodě silniční sítě. Pokud  $v_v \notin V$ , pak je třeba  $v_v$  vytvořit rozdělením hrany z  $E$  tak, aby pro původní hranu  $e_i = \{v_k, v_l\}$ , kde  $v_k, v_l \in V, e_i \in E$  platilo  $e_{i1} = \{v_k, v_v\}, e_{i2} = \{v_v, v_l\}$ . Přirozeně pak musí platit i  $w_i = w_{i1} + w_{i2}$ , kde  $w_i, w_{i1}, w_{i2}$  jsou odpovídající obrazy prvků z  $E$  ve  $W$ . Takto vytvořený graf  $G_L(V, E, W, L)$  je rozšířením původního grafu  $G$  o pohyblivý uzel reprezentující aktuální polohu vozidla.

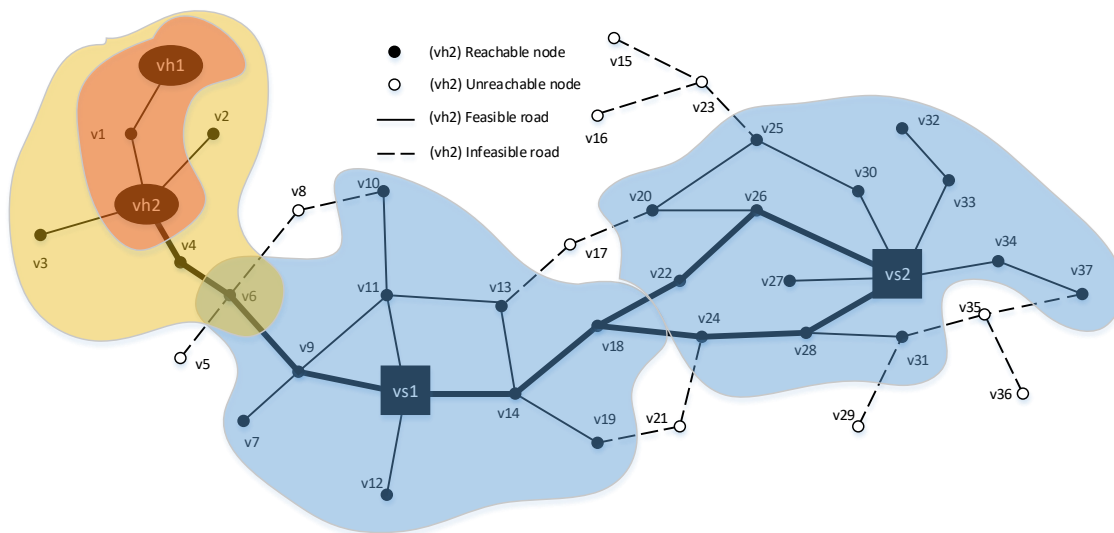
Uvažujme prozatím SA definovanou jediným bodem, jedinou nabíjecí stanicí, umístěnou v uzlu  $v_s$ . Vozidlo se na začátku cesty vyskytuje také ve  $v_s$ , takže  $v_s = v_v$  a  $sp(v_s, v_v) = 0$ . Baterie vozidla je plně nabitá a jeho dojezdová vzdálenost je  $R$ . Následně může vozidlo vyjet libovolným směrem do  $G$ , přičemž tento pohyb logicky snižuje zbývající kapacitu baterie. Vozidlo se může pohybovat volně, dokud platí  $R_L > sp(v_s, v_v)$ , kde  $R_L$  je aktuální dojezdová vzdálenost se zbývající kapacitou baterie v místě, kde se zrovna vozidlo nachází. Nicméně to platí pouze do bodu, kdy  $R_L = sp(v_s, v_v)$ . Tehdy se vozidlo musí doslova otočit do protisměru (tzv. U-turn) a zamířit nejkratší cestou k nabíjecí stanici. V tomto bodě také platí  $R_L = \overline{R}_L$ , kde  $\overline{R}_L$  je aktuálně ujetá vzdálenost od posledního nabití baterie. A protože  $R_L + \overline{R}_L = R$ , pak  $R = 2R_L$ . Tyto body ohraničují v nejzazším smyslu oblast nazvanou SA vztahenou k jediné stanici. Praktičtější pro vymezení SA je použití existujících uzlů. Množinu uzlů spadajících do SA označme  $V'$  a definujme indukovaný podgraf  $S$  grafu  $G$  s množinou uzlů  $V'$ , pro níž platí:  $V' \subseteq V$ , kde  $\forall v_i \in V': sp(v_s, v_i) \leq R_L$ , tedy  $sp(v_s, v_i) \leq \frac{R}{2}$ , eventuálně  $sp(v_s, v_i) \leq \frac{R-\mu}{2}$  pokud uvažujeme požadavek nenulové zbývající kapacity baterie  $\mu$ . Graf  $S(V', E', W')$  je tedy podgrafem  $G(V, E, W)$  splňujícím výše uvedené podmínky. O grafu  $S$  můžeme hovořit jako o SA reprezentované matematickým grafem.

Pro větší názornost může být celá situace demonstrována ilustrativním příkladem pomocí obr. 8. Na něm figurují dva uživatelé elektromobilu sídlící v uzlech  $v_{h1}$  a  $v_{h2}$ . Zároveň jsou v uzlech  $v_{s1}$  a  $v_{s2}$  umístěny veřejné nabíjecí stanice. Graf je prezentován graficky a hrany mají pro zjednodušení všechny shodnou velikost rovnou jedné. Dojezdová vzdálenost  $R = 5$  jednotek (hran). Zde je nutno podotknout zatím nekomentovanou skutečnost. Obecně se předpokládá, že existují základní dva typy nabíjecích stanic: veřejné a soukromé. Veřejné stanice jsou již zmíněné  $v_{s1}$  a  $v_{s2}$  a jsou volně přístupné komukoliv. Soukromé stanice jsou ve skutečnosti domácnosti uživatelů elektromobilů. U těch platí, že obsluhují pouze toho uživatele elektromobilu, který je jejich vlastníkem. Jinými slovy, obecně nelze nabíjet elektromobil u někoho cizího doma. Uživatel  $v_{h1}$  může soukromě nabíjet pouze u sebe doma, ve vrcholu  $v_{h1}$ , uživatel  $v_{h2}$  pouze ve vrcholu  $v_{h2}$ . SA stanice  $v_{h1}$ , používané výhradně uživatelem  $v_{h1}$ , je zobrazena červenou barvou. SA stanice  $v_{h2}$ , používané výhradně uživatelem  $v_{h2}$ , je zobrazena žlutou barvou.

Následuje otázka, které uzly jsou pro různé uživatele *dosazitelné* (*reachable*) a které hrany jsou *přípustné* (*feasible*).

Je zřejmé, že uvedený příklad implikuje uvažovat více než jednu SA. S uživatelem  $h_1$  se lze vypořádat hned úvodem, jelikož jeho množina dosazitelných uzlů je  $\{v_{h_1}, v_1, v_{h_2}\}$  a množina přípustných hran je  $\{\{v_{h_1}, v_1\}, \{v_1, v_{h_2}\}\}$  pokud je použit uzlový zápis pro identifikaci hran. Uživatel  $v_{h_1}$  zjevně jiné než své domácí SA, dosáhnout nemůže.

Nicméně uživatel  $v_{h_2}$  je schopen dostat se z SA vytyčené jeho soukromou stanicí do veřejné SA  $v_{s_1}$  a dokonce i dále až do SA  $v_{s_2}$ . Konkrétně je schopen dosáhnout všech uzlů, které jsou označeny plnými kolečkami, a neschopen dosáhnout uzlů, které jsou označeny prázdnými kolečkami. V rámci dosazitelných uzlů může cestovat po přípustných hranách, které jsou označeny plnými čarami, a nesmí cestovat po nepřípustných hranách, které jsou označeny přerušovanými čarami (pokud nechce, aby se mu vozidlo zcela vybil ještě předtím, než dojde k některé z nabíjecích stanic). Toto pojetí nepřípustných hran pochopitelně předpokládá zákaz otáčení se do protisměru někde uprostřed hrany. Rozhodovat o dalším směru lze jen v uzlech.



Obr. 8: Zjednodušený diagram silniční sítě  
(Zdroj: [105])

Z uvedeného plynou následující tvrzení. Dvě libovolné SA jsou *nápojené* (*connected*) právě tehdy když platí, že se z libovolného uzlu jedné SA dá dostat do libovolného uzlu druhé SA. To prakticky znamená, že pro stanice  $v_{s_1}, v_{s_2}$  definující SA  $S_1$  resp.  $S_2$  musí platit  $sp(v_{s_1}, v_{s_2}) \leq R$ . Stanice  $v_{s_1}$  a  $v_{s_2}$  mohou být libovolného typu, tedy obě veřejné, jedna soukromá, druhá veřejná nebo obě soukromé. Zde je opět důležité upozornit, že napojení musí být vztaženo k určitému konkrétnímu uživateli. Z řečeného plynou následující závěry:

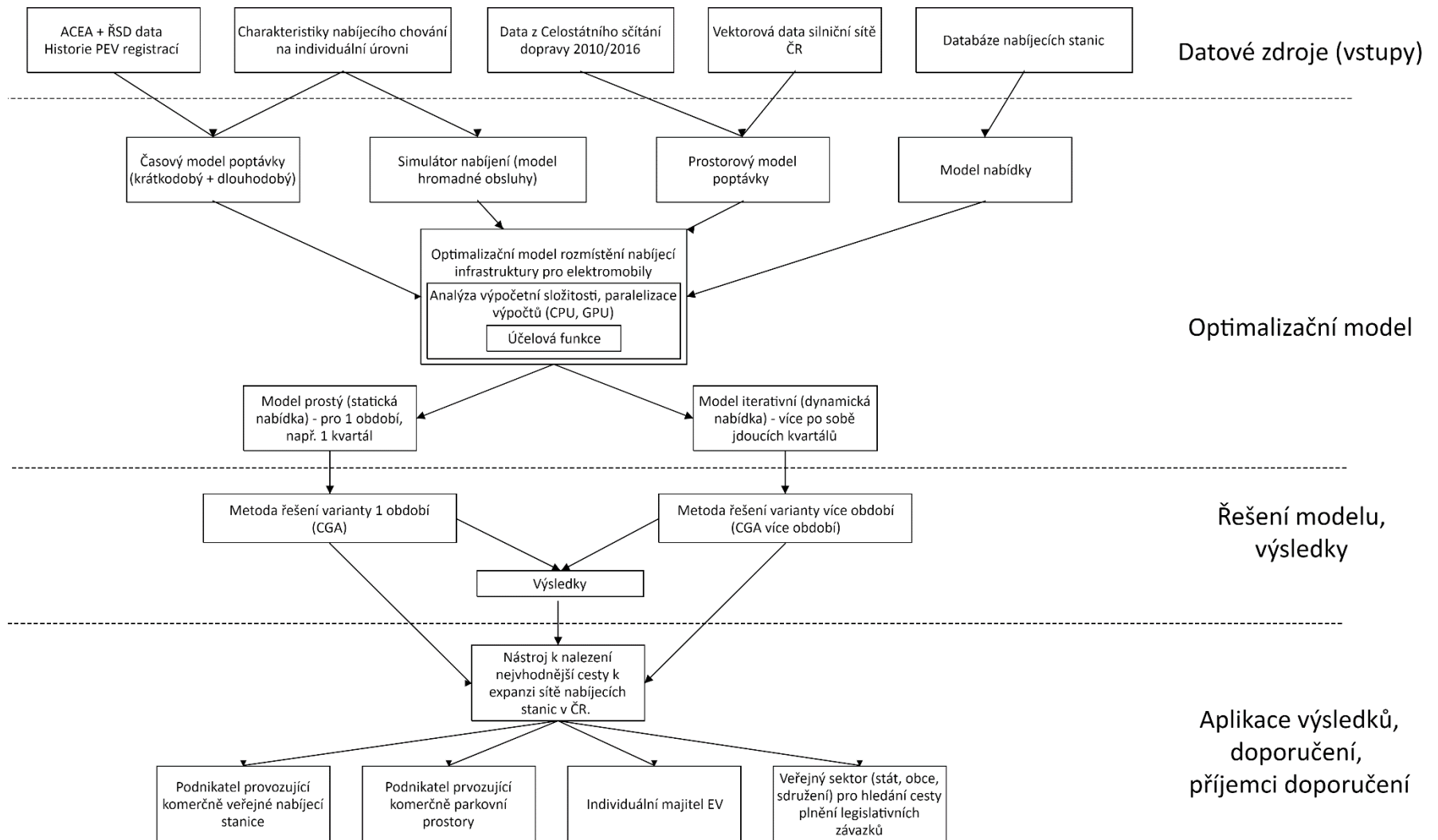
- Množina dostupných uzlů vzhledem k určitému jednomu uživateli vozidla je rovna sjednocení jeho napojených SA.



- *Množinu dostupných uzlů* vzhledem ke všem uživatelům lze nazývat množinou veřejně dostupných uzlů a je rovna sjednocení napojených veřejných SA.
- *Množina veřejně obslužených uzlů* je rovna sjednocení všech existujících veřejných SA, přičemž platí, že nemusí být navzájem napojené.

## 4.5 Architektura modelu

Celý model je tvořen jako úzce propojené knihovny funkcí a skriptů představující dílčí modely. Celkový obraz demonstruje diagram na obr. 9. Model lze rozdělit do čtyř vrstev. První vrstva definuje datové vstupy modelu z několika různých zdrojů. O těch pojednává zejména kapitola 5. Druhá vrstva popisuje samotné jádro práce, je tvořena několika dílčími modely, které jsou popsány v kapitolách 6, 7 a 8, a modelem popisujícím vzájemnou interakci. Ten je nazván optimalizačním modelem a pojednává o něm kapitola 9. Optimalizační model má dvě alternativní varianty, základní variantu optimalizující jediné období a obecnější variantu schopnou pracovat s více po sobě jdoucími obdobími. Obě tyto varianty jsou řešitelné optimalizačním algoritmem z kapitoly 10 ve třetí vrstvě, který pro ně nalézá optimální (z heuristického pohledu) řešení. Celý model včetně nalezených řešení lze pak ve čtvrté vrstvě označit za nástroj k nalezení nejvhodnější cesty expanze nabíjecí infrastruktury pro elektromobily v ČR, přičemž uvažuje různé typy subjektů jako jeho uživatele. Těmto uživatelům by model sloužil primárně jako nástroj po podporu rozhodování.



Obr. 9: Architektura navrženého modelu  
(Zdroj: vlastní zpracování)

## 5 Technické detaily práce

Kapitola obsahuje soubor různorodých témat technického charakteru, ke kterým je nutné poskytnout bližší komentář, ovšem která se svým tématem nedají zařadit do žádné z hlavních kapitol.

### 5.1 ŘSD data silnice

Databáze silniční sítě ČR byla od počátku základním stavebním kamenem celého modelu. Bylo konstatováno, že jakoukoliv bude mít model podobu, půjde o model zkoumající děj odehrávající se v silniční síti ČR. Lokalizace této prvotní databáze nebyla snadná. Subjekt ŘSD sice veřejně konstatuje, že poskytuje data veřejnosti mimo jiné pro vědecké účely, bohužel však neuvádí, jakou tato data mají povahu. Bylo nutné tuto státní instituci kontaktovat a vzájemně si upřesnit, jaké informace / data vůbec existují a jaká by bylo možné poskytnout. Z této komunikace vyplynula spolupráce s Národním dopravním informačním centrem v Ostravě (NDIC) spadající pod ŘSD, odkud nakonec vzešla většina datových podkladů použitých pro vývoj optimalizačního modelu. Nejprve se jednalo o zjednodušená vektorová data silniční sítě ČR [174] obsahující podklad pro vytvoření grafové reprezentace silniční sítě čítající informace o 30952 dopravních úsecích, kterým se zabývá kapitola 6, resp. článek [105]. Následovaly databáze vzniklé z průzkumu dopravy z roku 2010 a pozdějšího průzkumu z roku 2016 [140].

Zde ještě dodejme, že data ŘSD pojednávají pouze o „silnicích“ – pozemních dopravních komunikacích spadajících pod ŘSD. Pojem silnice je v celé práci použit jako zjednodušené označení mimoměstské komunikace nespécifikované třídy. Pod pojem silnice tak lze zahrnout dálnice a silnice 1 až 3. třídy dle Zákona o pozemních komunikacích [175], jejichž majitelem je zpravidla stát a které spravuje ŘSD. Proti silnicím stojí komunikace označované jako „ulice“, což je opět zjednodušené označení pro místní komunikace, jejichž majitelem jsou jednotlivé obce. Jestliže tvrdíme, že použitá databáze obsahuje pouze data o silnicích, pak celý na ní postavený model pojednává pouze o silnicích. Celostátní průzkumy dopravy jsou rovněž prováděny na silnicích, ulice obcí jsou z něj vyjmuty. Z takových dat se tedy obecně nedozvíme, jak funguje doprava uvnitř obcí. To znamená, že ani celkový model nemůže poskytnout informace o rozmístování nabíjecích stanic uvnitř obcí. Navržený model je z vysvětlených důvodů takto omezen a s tímto omezením je nutno počítat zejména při úvahách o jeho aplikaci.

### 5.2 ŘSD data doprava 2011

Téměř celý model byl vytvářen na datech o hustotě dopravy pocházejících ze sčítání dopravy z roku 2011 [176]. Tato databáze byla použita proto, že v době počátečních úvah o optimalizačním modelu v roce 2014 se jednalo o nejjobsáhlejší a nejaktuálnější veřejně dostupný průzkum hustoty dopravy pro území ČR. Databáze obsahuje informace o měření hustoty dopravy na 8317 dopravních úsecích na dálnicích, silnicích I. třídy a vybraných silnicích nižších tříd. Informace jsou kategorizovány podle typu vozidla, pro

účely této práce jsou relevantní především vozidla osobní do 3,5 tuny. Data o dopravě a data o silniční síti nejsou vzájemně zcela odpovídající. Kapitola 6 obsahuje bližší komentář k tomuto faktu a způsob, jakým byla data spojena. Ukázka prvních 4 záznamů dat je k dispozici v Příloze 5.

Ne všechny atributy dat byly při tvorbě modelu použity. Tab. 2 poskytuje výčet použitých atributů spolu s jejich popisem. Primárně citovaná data pojednávají o tzv. ročním průměru denních intenzit dopravy (RPDI) různých typů vozidel. Metadata k těmto atributům jsou dostupná na oficiálním webu prezentujícím podrobné výsledky dopravy [176]. Ostatní atributy mimo ty uvedené v tab. 2 buď blíže popisují daný úsek, nebo poskytují podrobnější rozpad údajů o dopravě (RPDI pro autobusy, traktory, těžká a lehká nákladní vozidla atp., popř. ukazatele variací silniční dopravy). Data v podobě uvedené v Příloze 5 nejsou veřejně přímo dostupná. Pro účely disertační práce byla extrahována na zakázku pracovníky NDIC ŘSD z jejich interní databáze.

Tab. 2: Popis použitých atributů dat Sčítání dopravy

Atribut	Popis
<b>BoundingBox_1</b>	hodnota zeměpisné šířky jihozápadního rohu obdélníkového bounding boxu v S-JTSK souřadnicích
<b>BoundingBox_2</b>	hodnota zeměpisné šířky severovýchodního rohu obdélníkového bounding boxu v S-JTSK souřadnicích
<b>BoundingBox_3</b>	hodnota zeměpisné délky jihozápadního rohu obdélníkového bounding boxu v S-JTSK souřadnicích
<b>BoundingBox_4</b>	hodnota zeměpisné délky severovýchodního rohu obdélníkového bounding boxu v S-JTSK souřadnicích
<b>X_1</b>	hodnoty zeměpisné šířky uzlů definující začátky, resp. konce úseků uvnitř obdélníkového bounding boxu (proměnlivý počet)
...	
<b>X_n</b>	
<b>Y_1</b>	hodnoty zeměpisné délky uzlů definující začátky, resp. konce úseků uvnitř obdélníkového bounding boxu (proměnlivý počet)
...	
<b>Y_n</b>	
<b>DELKA_SU</b>	délka silničního úseku v metrech
<b>O</b>	RPDI osobních a dodávkových vozidel bez přívěsů i s přívěsy
<b>ZU</b>	slovní popis začátku úseku (orientačně)
<b>KU</b>	slovní popis konce úseku (orientačně)

(Zdroj: vlastní zpracování, podle [176])

### 5.3 ŘSD data doprava 2016

Během roku 2016 provedlo ŘSD nové sčítání dopravy [140]. Výsledky tohoto sčítání byly zpracovány začátkem roku 2017 a v polovině roku 2017 se podařilo získat tuto nově aktualizovanou databázi prostřednictvím NDIC, ŘSD. Tato nová databáze posloužila jako vstupy optimalizačního modelu zachycující nejaktuálnější chování uživatelů prostřednictvím údajů o hustotě dopravy na jednotlivých silničních úsecích ČR. Databáze z roku 2016 pojednává zhruba o stejných úsecích jako ta z roku 2011, konkrétní počet je 8384. Náhled obou je dostupný z [140], kde lze přes poměrně přehledné grafické rozhraní detailně zkoumat obě verze. Příliš nepřekvapí, že data se oproti roku 2010 nějak zásadně neliší. I zde byla nutná ad hoc extrakce dat pracovníky NDIC ŘSD.

## 5.4 Open Charge Map data

Pro úplnost kapitoly 5 je vhodné zmínit i Open Charge Map databázi [177], jejíž bližší popis a důvody jejího zvolení lze však najít až v kap. 7.2.

## 5.5 Data o počtech elektromobilů v ČR

Počty elektromobilů v rámci různých států lze obvykle zjistit ze zdrojů veřejných institucí. Pro ČR jsou pak tyto údaje dostupné přímo ve statistikách Ministerstva dopravy v rámci Centrálního registru vozidel [178]. Bohužel, data jsou publikována neočištěna o chybné a nejednoznačně vložené záznamy a neagregována přes hlavní kategorie. Neexistují například agregace přes hlavní typy pohonu ve stylu: benzín, nafta, LPG, hybrid, elektřina. Zpracování do užitečného formátu je zřejmě přenecháno uživateli.

## 5.6 Souřadnicové systémy

Různé datové zdroje používají různé souřadnicové systémy. Datové zdroje určené pro ČR používají často jiný souřadnicový systém, tzv. S-JTSK, odlišný od toho, který používá zbytek světa, tzv. WGS-84. Důvod je dán historicky a konvencí a nemá smysl se jím dál zabývat. Problém nastává, když použité datové zdroje mají různý formát. V takovém případě je potřeba souřadnicové systémy sjednotit. V práci, je použito obou systémů, preferován je vždy ten, který je vhodnější. Kritériem vhodnosti je nejčastěji rozsah nezbytné transformace. Pokud je třeba spojit dva datové soubory, přičemž jeden obsahuje matici 20 tisíc souřadnic v jednom souřadnicovém systému a druhý obsahuje 150 souřadnic v druhém systému, pak bude transformován menší datový soubor do systému, ve kterém je větší datový soubor. V práci se tato nutnost vyskytuje několikrát, a tak je použito transformace z S-JTSK do WGS-84 i transformace inverzní. Knihovna transformačních funkcí není dílem autora, je pouze poupravená, převzatá z [179]. Následuje stručná definice obou formátů.

### 5.6.1 S-JTSK

Jde o pravoúhlý souřadnicový systém používaný v geodézii vyvinutý za účelem usnadnění zeměměřičských prací na území České republiky a Slovenska. Systém je založen na Křovákově zobrazení stanoveném v roce 1922 a využívá 42 v Čechách ležících referenčních bodů. Aktuálně se systém používá v jeho původní podobě, popř. v jeho zpřesněné verzi z roku 1995 [180].

### 5.6.2 WGS-84

Systém WGS-84 je pravotočivý pravoúhlý souřadnicový systém používaný v geodézii a navigaci. Systém je geocentrický, jeho ukotvení je ve středu Země (včetně oceánů a atmosféry). Jeho použití nepreferuje žádné konkrétní území na Zemi (jak je to v případě S-JTSK), což je jeden z důvodů jeho velkého mezinárodního významu [181].

## 5.7 Geodetická vzdálenost

Na několika místech v práci je zmiňováno měření vzdálenosti dvou bodů na území ČR pomocí tzv. *geodetické vzdálenosti*. Tento pojem není oficiálním pojmem. Jde pojmenování navržené autorem, jehož smyslem je odlišit rozdílná paradigmatu měření vzdálenosti dvou bodů v trojrozměrném prostoru. Nyní je nutné pojem definovat a vymežit oproti ostatním. Označením „geodetická“ je odkazováno na paradigma, se kterým nejčastěji pracuje obor geodézie. Geodetickou vzdáleností je pak myšlena délka nejkratší spojnice dvou bodů ležících na povrchu koule (případně elipsoidu), přičemž tato spojnice vede po povrchu dané koule. Při tomto měření se využívá souřadného systému definovaného na elipsoidu se systémem WGS-84. Zavedení pojmu geodetická vzdálenost umožňuje odlišit tento způsob měření vzdálenosti od běžného pojmu „vzdálenost“, kterou v trojrozměrném prostoru standardně reprezentuje euklidovská vzdálenost dvou bodů. V práci, zejména pak v kapitole 6, se vymezuje geodetická vzdálenost vůči grafové vzdálenosti.

Jestliže označíme euklidovskou vzdálenost mezi body  $A$  a  $B$  ležícími na povrchu Země  $\varepsilon(A, B)$ , geodetickou vzdálenost podle elipsoidu  $e$  mezi těmito body  $\gamma(A, B, e)$  a grafovou vzdálenost v síti  $\sigma$  mezi těmito body  $\theta(A, B, \sigma)$ , pak můžeme konstatovat, že platí rov. 1, která znázorňuje rozdílnost uvedených typů měření vzdálenosti a tím pádem nutnost jejich rozlišování. Samotný vzorec pro výpočet geodetické vzdálenosti  $\gamma$  dvou bodů ve sférických souřadnicích pak definuje rov. 2 [182].

$$\forall A, B, A \neq B: \varepsilon < \gamma \leq \theta \quad \text{Rov. 1}$$

$$\gamma([\phi_A, \lambda_A], [\phi_B, \lambda_B]) = 2r \cdot \arcsin \sqrt{\sin^2 \frac{\phi_A - \phi_B}{2} + \cos \phi_A \cdot \cos \phi_B \cdot \sin^2 \frac{\lambda_A - \lambda_B}{2}} \quad \text{Rov. 2}$$

## 5.8 Zdroje informací o technologiích nabíjecí infrastruktury

Cílem práce není řešení technické stránky nabíjení vozidel, takže autor se v celé práci záměrně snaží vyhýbat jakýmkoliv zmínkám o technologii nabíjecích stanic, standardech konektorů, rozdílnostech v úrovních technologie, kompatibilitou technologií, legislativními omezeními spojenými s autorským právem na technologie, s názvoslovím apod. Bohužel, pro důstojný pohyb v problematice však musí mít autor alespoň základní povědomí o těchto záležitostech, tudíž témata musela být prozkoumána alespoň povrchně z níže uvedených zdrojů. Cílem této stručné kapitoly není rešerše těchto zdrojů, pouze jejich výčet a stručný popis obsahu.

Studie z kanadského Québecu zabývající se základními technologiemi z oblasti elektromobility [183] a analogické studie z USA [184]. Mezinárodní standard upravující elektrické konektory v článku anglické verze Wikipedie [185]. Německý report o lokálním stavu elektromobility a souvisejících technologiích [186]. Přehledné srovnání dvou základních typů nabíjecích stanic, tzv. Level 1 a Level 2 [187]. Příklad jednoho z mnoha obchodníků působících na trhu nabíjecích stanic [188]. Na jednu stranu jde o

produktové stránky výrobce využívajícího partnerskou síť, která distribuuje produkty koncovým zákazníkům (jelikož nabíjecí zařízení zpravidla vyžadují odbornou instalaci), na druhou stranu je zde přímo dostupných e-shop produktů. V e-shopu lze přehledně zjišťovat zejména aktuální ceny vybavení. Článek typu „white paper“ o požadavcích, se kterými je třeba počítat při instalaci nabíjecí stanice [189].

## 5.9 Parametry PC

Veškeré výpočty byly prováděny na PC. Konvence si žádá uvedení parametrů tohoto přístroje. V souvislosti s kapitolou 9.5 zdůrazníme zejména takty a počet vláken procesoru a grafické karty. Dedikované GPU sice umožňuje optimalizaci výpočtu představenou v kap. 9.5.2, avšak samotný model není v porovnání s aktuálními modely na trhu příliš výkonný.

Tab. 3: Technické parametry výpočetního PC

Procesor	Intel Core i7 4700MQ@2,4 GHz, Haswell, 4 jádra, 8 vláken
Operační paměť	DDR3 RAM, 8 GB
Grafická karta	NVIDIA GeForce GT 755M, 980 MHz, 384 pipelines, 2 GB
Úložiště	1TB HDD, 5400 rpm
Operační systém	MS Windows 10, 64-bit

(Zdroj: vlastní zpracování)

## 5.10 Popisky obrázků, tabulek a grafů; odborné termíny, názvy funkcí

Disertační práce je v českém jazyce. Veškeré obrázky, tabulky a grafy, které byly tvořeny primárně pro tuto práci, mají popisky v českém jazyce. Čtenář však může narazit na případy, kdy jsou zejména popisky obrázků v angličtině. Jde o případy, kdy jsou buď citovány zdroje cizích autorů, pak je pochopitelně obrázek v originální podobě, nebo se jedná o případy, kdy obrázek je sice dílem autora, ten jej ale poprvé publikoval v nějakém svém článku v cizojazyčném časopise či sborníku. V takovém případě je pak podoba obrázku původní včetně popisků a původní autorův článek je standardně citován. Nejedná se tedy o nekonzistenci v jazykovém popisu doprovodné grafiky disertační práce, naopak se jedná o snahu konzistentně uvádět nepůvodní materiály v jejich originální podobě.

Čtenář také může narazit na určité anglicky znějící termíny, které autor používá v jejich původní anglické podobě, nijak je nepřekládá, ani česky neopisuje. Nejmarkantnější je zřejmě použití termínů *mesh* a *service area*. Tyto pojmy jsou používány poměrně často, avšak jejich český výstižný ekvivalent prakticky neexistuje. Na příslušných místech jsou proto přesně definovány a dále používány v původní anglické podobě. Autorův názor je takový, že pro čtenáře v dnešní době bude přijatelnější používání stručného a přesně definovaného pojmu v anglickém znění, například *mesh*, než snaha o jeho překlad jako „pletivový model“ nebo „mřížkový model“.

Do třetice, čtenář může narazit na názvy vlastních funkcí z prostředí MALTAB, které jsou v anglickém jazyce a zpravidla vystihují význam dané funkce. Jelikož prostředí MATLAB nepodporuje českou diakritiku v názvech funkcí, byla raději pro jejich

pojmenování volena angličtina. České názvy bez možnosti použití české diakritiky byly shledána jako horší varianta systému popisu než použití anglických názvů. Konvence toto ostatně běžně připouští.



## 6 Model poptávky po nabíjecí službě

Počínaje touto kapitolou, dostáváme se z rešeršní a analytické do návrhové části práce. Jednotlivé kapitoly budou nyní pojednávat o dílčích částech problematiky, přičemž každou z těchto částí je vyvinut odpovídající dílčí model. V této kapitole se budeme zabývat poptávkou po nabíjecí službě a jejím modelem. S ní bude úzce souviset nabídka nabíjecí služby, jejíž model je předmětem kapitoly následující.

Poptávkou po nabíjecí službě se má na mysli poptávka uživatelů osobních elektromobilů po veřejně dostupné službě nabíjení jejich vozidla, kterou poskytují veřejně dostupné nabíjecí stanice na území ČR.

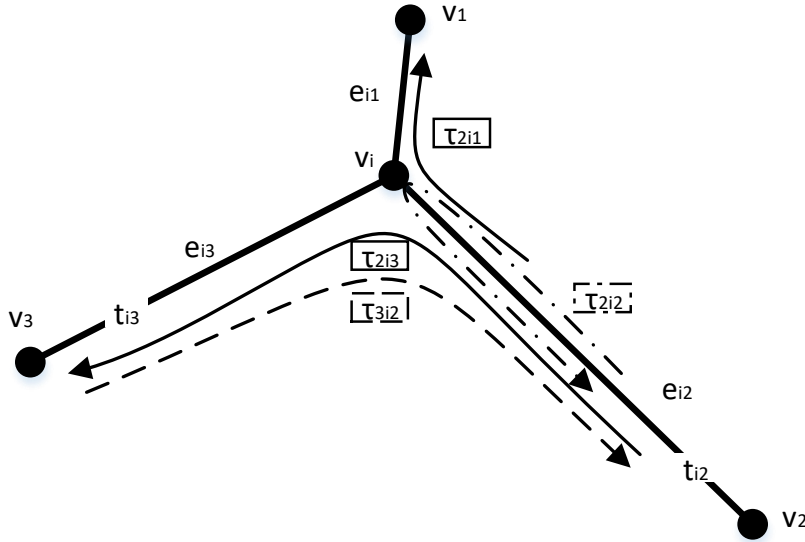
### 6.1 Geneze modelu poptávky a zavržené verze

Model poptávky je z chronologického hlediska nejstarší částí práce. Jeho podoba byla diskutována již v pilotním článku [105], avšak během času byla několikrát měněna. Proměna byla zapříčiněna postupnou krystalizací požadavků na model, které se vyskytovaly jak na straně vstupu (dostupné datové soubory, ze kterých model vychází), tak na straně výstupu (vypovídací schopnost modelu a jeho konkrétní podoba). Původní záměr byl navrhnout model poptávky jako ohodnocený neorientovaný graf, tj. matematickou strukturu sestávající z množiny uzlů a hran. Tato podoba by velmi přesně reprezentovala silniční síť, neboť uzly grafu by představovaly křižovatky silnic a hrany by představovaly silniční úseky mezi nimi. Ohodnocení hrany by umožnilo modelovat délku úseku, hustotu dopravy na úseku, typ komunikace apod. Bylo zde možné velmi výstižně definovat *service area* stanice, tedy oblast, které je obsluhována určitou nabíjecí stanicí. Tento formát byl použit v článcích [105] [132] a do značné míry rozpracován i v [106]. Reprezentovat model jako graf bylo rovněž velmi vhodné proto, že v datových souborech získaných z ŘSD [174] byla silniční síť explicitně ukládána jako množina uzlů a množina tzv. úseků, tedy hran.

Problém se objevil až když mělo dojít ke stanovení hodnoty veličiny *poptávka po nabíjecí službě* na celém uvažovaném území ČR. Tato veličina měla být identifikovatelná v každém bodě území, přičemž skutečně známá byla pochopitelně pouze v některých jeho částech (na hranách grafu). Dvě nejdůležitější metriky, tj. vzdálenost a hustota dopravy, byly originálně definovány pouze na hranách grafu. Bylo navrženo několik způsobů přepočtu [190] jak převést vágní hranové ohodnocení na konkrétnější uzlové ohodnocení, přičemž měla být zachována podstata informace, kterou takový graf poskytuje. Mělo se učit, v kterých místech silniční síť se lidé více pohybují, tedy kde lze očekávat vyšší poptávku po nabíjecí službě. Problém byl, že všechny navrhované přepočtové modely se příliš vzdalovaly realitě.

### 6.1.1 Původně navržený model

Například publikovaný model [190] využívající hrano-uzlové transformace se snaží dekomponovat dopravu na každém úseku na jednotlivé složky a tyto složky použít k tomu, aby definoval dopravu v konkrétním bodě (obr. 10, rov. 3 až rov. 5).



Obr. 10: Dekompozice hustoty dopravy na jednotlivé směrové složky  
(Zdroj: [190])

$$\mathcal{J} = \begin{pmatrix} \tau_{1i1} & \cdots & \tau_{1ik} & \cdots & \tau_{1i\delta_i} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{ji1} & \cdots & \tau_{jik} & \cdots & \tau_{ji\delta_i} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{\delta_i i 1} & \cdots & \tau_{\delta_i i k} & \cdots & \tau_{\delta_i i \delta_i} \end{pmatrix} \quad \text{Rov. 3}$$

$$t_{ij} = (\tau_{ji1} + \cdots + \tau_{jik} + \cdots + \tau_{ji\delta_i}) + (\tau_{1ik} + \cdots + \tau_{jik} + \cdots + \tau_{\delta_i ik})$$

$$t_{ij} = \sum_{k=1}^{\delta_i} \tau_{jik} + \sum_{j=1}^{\delta_i} \tau_{jik} \quad \text{Rov. 4}$$

$$t_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\delta_i} t_{ij} \quad \text{Rov. 5}$$

Následně je tato uzlově definovaná hustota dopravy na známých uzlech použita k aproximaci hustoty na neznámých uzlech, tj. uzlech sítě, pro které není k dispozici metrika dopravy a následuje návrh modelu poptávky po nabíjecí službě. Tento model předpokládá, že uživatelé PEV jsou ochotni cestovat mimo svůj obvyklý výskyt, tj. místo, kde byla zachycena jejich přítomnost v silniční síti při měření hustoty dopravy, do místa

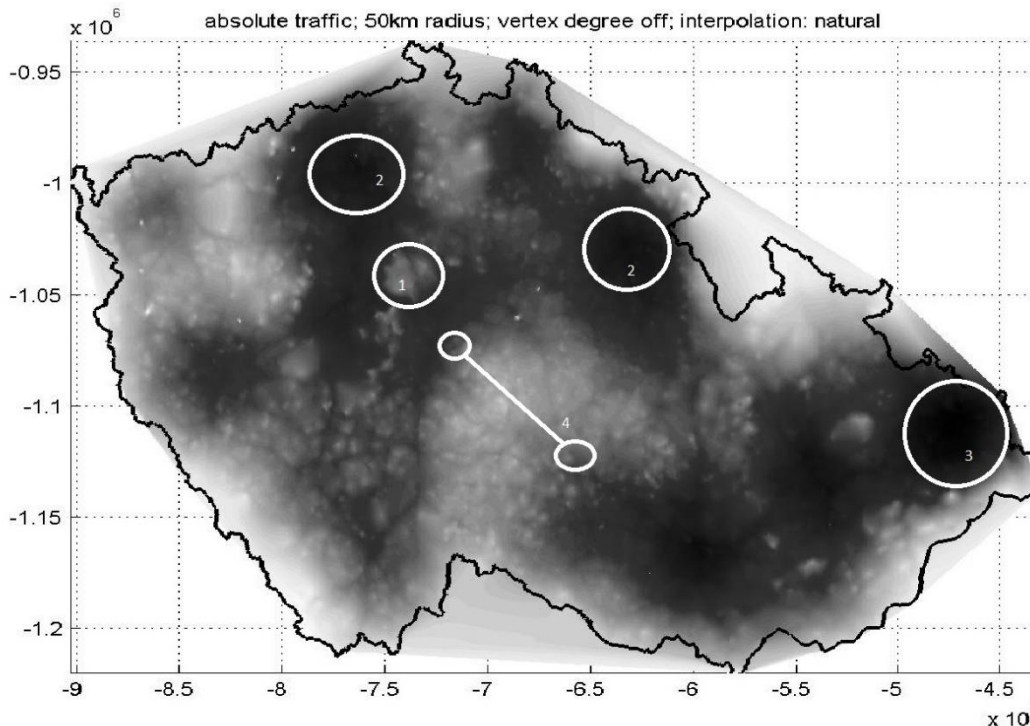
potenciálního výskytu nabíjecí stanice. Tento předpoklad je sám o sobě diskutabilní, nicméně v modelu je použit a způsobuje jisté nežádoucí efekty (rov. 6 a rov. 7). Pro ty je sice navrženo určité řešení (rov. 8 nebo rov. 9), bohužel ani to nepřináší významné zlepšení a aplikace takového modelu obsahuje nerealistické artefakty viditelné na obr. 11. Popis těchto artefaktů spolu s podrobným popisem původního modelu je dostupný v příslušném článku [190], zde se můžeme omezit na konstatování jeho hlavních nedostatků. První problém byl, že model nerealisticky přeceňoval poptávku v oblastech, kde byla siliční síť velmi hustá, avšak skutečná hustota dopravy tomu neodpovídala. Tyto oblasti mají na obr. 11 číslo 2, částečně toto platí i pro číslo 3. Dalším problémem bylo, že model naopak podceňoval poptávku v oblastech, které mají velmi řídkou hustotu siliční sítě, zejména pak dlouhé dálniční úseky, na obr. 11 zobrazeny jako číslo 4.

$$g_{ij}((v_i, v_j), d_{max}) = \frac{d_{max} - d((v_i, v_j))}{d_{max}} \quad \text{Rov. 6}$$

$$CD_i = \sum_{j=1}^{n_i} g_{ij} t_j \quad \text{Rov. 7}$$

$$CD_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{2}{\delta_j} g_{ij} t_j \quad \text{Rov. 8}$$

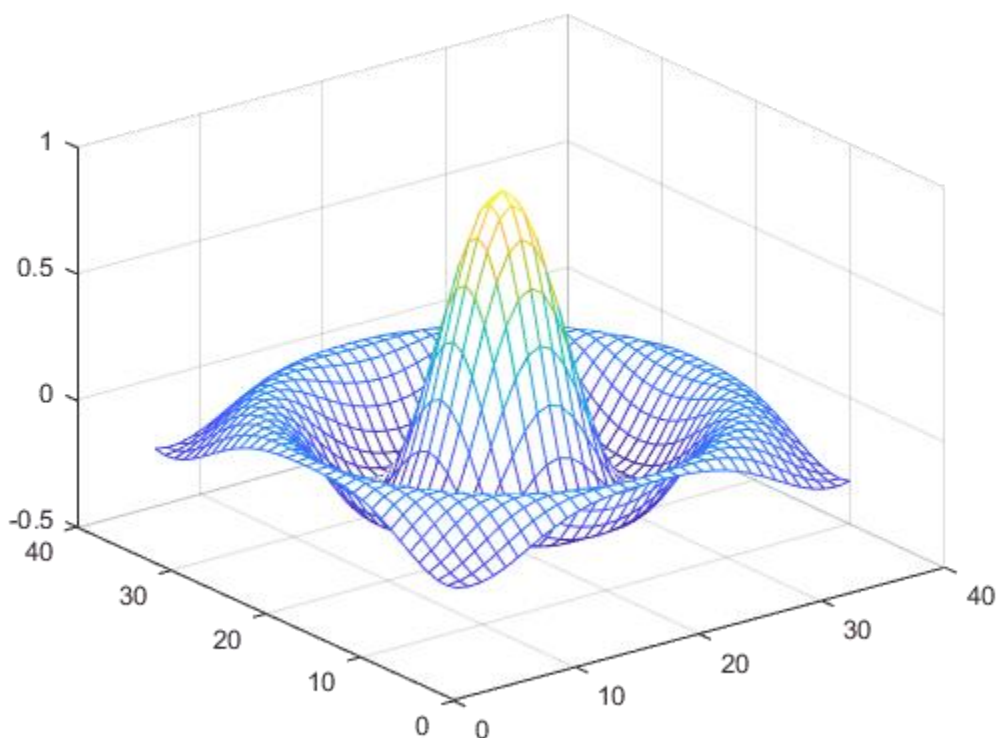
$$CD_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} g_{ij} t_j \quad \text{Rov. 9}$$



Obr. 11: Poptávka na území ČR: výsledek modelu z rov. 7  
(Zdroj: [190])

Uvedený model měl navíc tu nevýhodu, že tyto hodnoty poptávky byly definovány pouze na uzlech grafu, tedy přibližně na 8000 místech. Mimo tyto body nebyla poptávka definována a nastal problém, jak poptávku mimo známé body stanovit. Z toho důvodu bylo navrženo řešení, které tento nedostatek odstraňovalo a současně podstatně zjednodušovalo výpočty související se stanovováním vzdálenostních metrik.

Řešením bylo vytvoření trojrozměrného povrchu pomocí tzv. *3-D wireframe mesh* z obr. 12 (zkráceně *mesh*), který byl sestaven pomocí interpolace ze známých, neekvidistantně rozložených bodů – uzlů grafu. Tímto způsobem byl získán model, který dokázal určit hodnotu poptávky v libovolném bodě uvažovaného území, přičemž množství bodů, resp. hustotu mesh sítě bylo možné libovolně měnit. Významnou výhodou modelu typu mesh oproti modelu založeném na objektu matematického grafu totiž je, že dochází k ukotvení známých hodnot – uzlů grafu, do pevné mřížky podle souřadnic každého z uzlů, což odpovídá realitě mnohem lépe než samotný graf. Připomeňme, že uzly grafu nejsou nijak definovány svou vzájemnou polohou v prostoru, nemají v prostoru pevné ukotvení. Jejich „poloha“ je pouze relativní, je definována vůči ostatním bodům pomocí množiny hran. Technicky by bylo možné obohatit původní objekt grafu  $G(V, E)$  nesoucí informaci pouze o uzlech a hranách o další množiny, např. množinu polohy  $L: V \rightarrow \mathbb{R}^2$ , dopravy  $T: E \rightarrow \mathbb{R}$ , vzdálenosti  $D: E \rightarrow \mathbb{R}$  apod., což by dávalo objekt  $G(V, L, E, T, D, \dots)$ . Z hlediska počítačového zpracování však ani toto není nejvhodnější přístup z důvodu přílišné výpočetní složitosti a požadavků na paměť počítače.



Obr. 12: Příklad objektu vytvořeného pomocí wireframe mesh v prostředí MATLAB (Zdroj: [191])

### 6.1.2 Výpočetní a paměťová náročnost

Pokud krátce srovnáme model založený na objektu grafu a model založený na mesh síti z hlediska výpočetní a paměťové náročnosti, pak jsou výhody mesh sítě zjevné. Grafový model je v softwaru MATLAB reprezentován několika maticemi. Tyto matice mohou být různého druhu, nejčastěji jsou však obdobou matice sousednosti, tzn. čtvercové matice s binárními prvky, kde prvek  $m_{ij}$  rovnající se 1 znamená, že existuje hrana mezi uzly  $i$  a  $j$ . Pokud se prvek matice  $m_{ij}$  rovná 0, pak hrana neexistuje. Taková matice sousednosti je tedy dvojrozměrné čtvercové pole o velikosti  $|V|^2$  bitů, kde  $V$  je množina uzlů grafu. Problém je, že počet uzlů se v reálné aplikaci pohybuje v tisících až v desetitisících, což klade nároky na operační paměť počítače řádově na desítky až stovky megabytů. Jak ale bylo ukázáno výše, pro dodatečné grafové metriky jako je vzdálenost, doprava, poloha vrcholů, si nelze vystačit pouze s maticí sousednosti. Pro každou hranovou metriku je potřeba vytvořit matici analogického tvaru a velikosti jako je matice sousednosti, kde její prvky obsahují hodnoty dané metriky pro každou existující hrana. To znamená, že hodnoty pole nejsou binární, tzn. paměťové nároky nejsou 1 bit, ale například 2, 4 nebo 8 bajtů – záleží na použitém datovém typu. To okamžitě zvyšuje potřebu operační paměti na každé z těchto polí na řádově stovky megabytů, až jednotky gigabytů, v nejhorším případě nízké jednotky desítek gigabytů. Při této velikosti již mohou mít některá méně výkonná PC problém s alokací tak rozměrných polí.

Existuje způsob, jak tato pole komprimovat pomocí formátu řídkých matic, jelikož jen velmi málo hodnot je v poli skutečně uvedených. Tato problematika byla detailně diskutována dříve [106] a relevantní výňatek lze nalézt v Příloze 1. Problém s řídkými maticemi, resp. s poli v řídkém formátu je ovšem v tom, že vyhledávání v takových polích je podstatně časově náročnější než v polích plných [191].

Dalším rozdílem grafové reprezentace modelu oproti mesh reprezentaci je počítání odvozených metrik, zejména vzdáleností, vzájemné polohy, nejkratších cest, obsahu oblastí apod. Od modelu poptávky se samozřejmě očekává, že bude schopen všechny tyto metriky definovat a interpretovat je co nejpřirozeněji ve vizuálně srozumitelném formátu. Je například výpočetně poměrně náročné stanovit service area pro určitý uzel, jelikož je potřeba vypočítat tzv. *strom nejkratších cest* [192]. Výpočet je pro uvažovaný graf silniční sítě ČR sice realizovatelný, ale délka výpočtu se na stolním PC pohybuje v řádu hodin. Z uvedeného plyne, že model poptávky založený na grafu nelze škálovat, model má fixní velikost a s ní spojenou výpočetní a paměťovou náročnost.

Oproti tomu, pokud je použit model typu mesh, tak výpočetní a paměťová náročnost jdou ruku v ruce s proměnlivou velikostí. Pokud je zvýšena nebo naopak snížena hustota sítě, pak se mění jak paměťové požadavky na alokované pole, tak výpočetní náročnost operací s těmito poli. To pochopitelně za cenu změny přesnosti modelu, nicméně v uvažované variantě lze pokrýt maticí o velikosti 30 MB kompletně celý povrch ČR s přesností na 100 metrů, což je dostatečné. Operace na této matici, tj. například zmíněné určení service area, je pak otázkou zlomků sekund případně jednotek sekund. Model formátu mesh je navíc určen ke grafické reprezentaci, tudíž jeho renderování do vizuálně pochopitelné podoby lze provést bez zásadních úprav.

Existuje však jeden aspekt, který není v modelu typu mesh zachycen. Jde o pojetí měření vzdálenosti v silniční síti, které se v mesh modelu liší od grafového modelu, a to poměrně významně. Této skutečnosti je věnována následující kapitola 6.2.

## 6.2 Přepočítání metrik

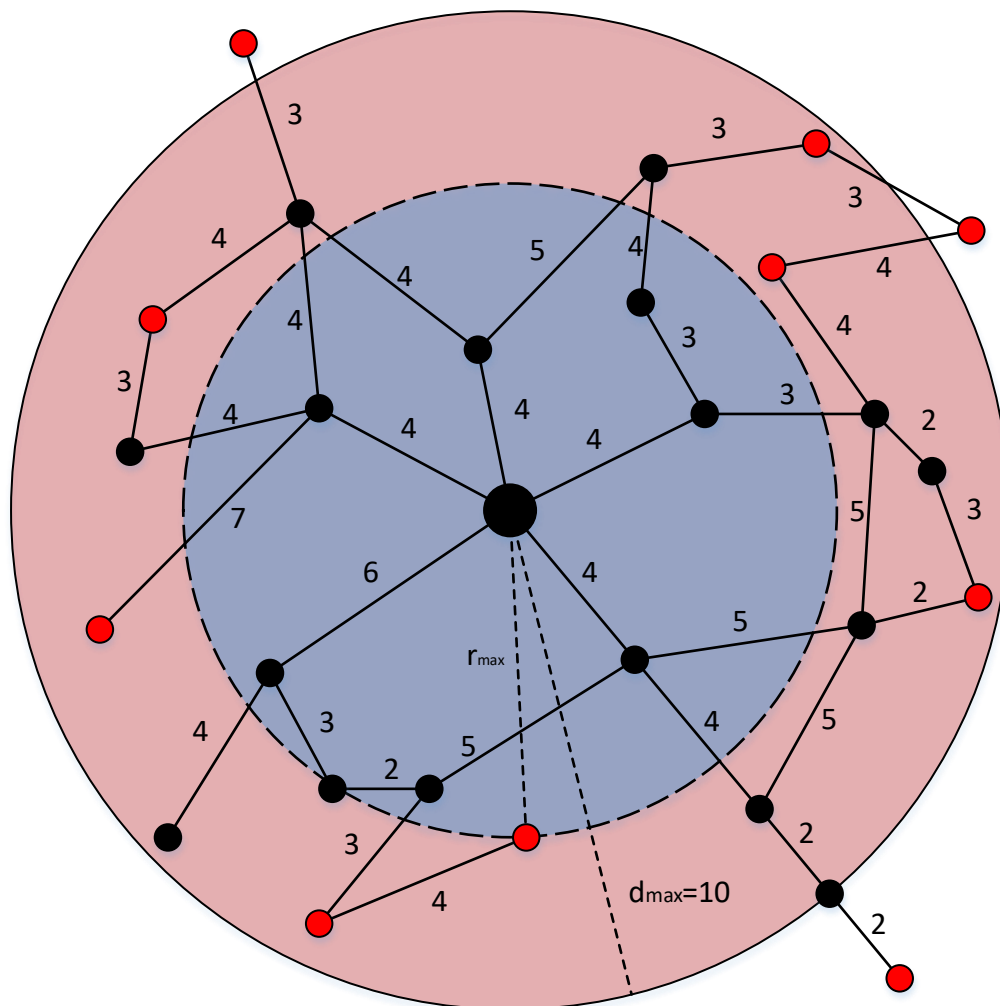
Silniční síť byla původně reprezentována grafem. I při použití řídkých matic se hardwarová a praktická výpočetní náročnost stala příliš velkou a bylo rozhodnuto, že vhodnější formát bude použití maticového pokrytí meshem. Stále je však potřeba zohledňovat vzdálenosti dané grafem. Vzdálenost dvou bodů silniční sítě musí být dána nikoliv jako jejich euklidovská, či přesnější geodetická vzdálenost, ale jako délka nejkratší cesty v grafu mezi těmito dvěma body. Jak již bylo řečeno, pro praktické účely se ukázala tato metoda nevhodná z důvodu velikosti a formátu použitých datových struktur. Řešením je model využívající vysokou manipulovatelnost a škálovatelnost meshe a současně respektující vzdálenostní omezení daná grafem. Aby bylo možné mesh použít, musí se provést transformace grafové reprezentace silniční sítě do mesh reprezentace.

### 6.2.1 Odvození transformace

Nyní popíšeme způsob, jak zachovat omezení kladené na měření vzdáleností v silniční síti, ale při interpretaci sítě pomocí meshe. Z definice účelu modelu poptávky plyne, že jediné významné měření vzdáleností je třeba při určování rozsahu service area, tedy množiny bodů, která jsou od středu service area ve vzdálenosti menší nebo rovné  $d_{max}$ . Cílem je tedy převést oblast service area definovanou grafem na service area definovanou meshem při zachování daného omezení.

Celou situaci nejlépe znázorníme na grafickém příkladu z obr. 13. Původně existuje graf silniční sítě znázorněný jako uzly a odhodnocené hrany. Ve středu tohoto grafu existuje kořenový uzel zobrazený jako velká černá tečka. Service area je množina uzlů grafu, které jsou ve vzdálenosti nejvýše  $d_{max} = 10$  od kořenového uzlu. Vzájemná vzdálenost uzlů  $d$  je dána jako nejkratší cesta mezi těmito uzly, tedy jako nejkratší cesta mezi kořenovým uzlem a postupně všemi ostatními uzly grafu. Uzly patřící do service area kořenového uzlu jsou zobrazeny jako černé tečky, uzly mimo tuto service area jsou červené.

Nyní chceme převést toto rozdělení dané podmínkou  $d \leq d_{max}$  do meshe, v našem obrázku to znamená do roviny. Je zřejmé, že množina bodů splňující takovou podmínku v rovině bude kruhová. Ovšem jaký bude poloměr  $r$  takového kruhu? Nemůže zřejmě platit  $r = d_{max}$ , jelikož by do této oblasti patřily i některé uzly, které nepatřily do původní service area dané grafem. Takové uzly by totiž byly ve vzdálenosti větší než  $d_{max}$  a musely by být znázorněny červeně. Tento případ zachycuje červeně podbarvený kruh na obr. 13. Jsou v něm sice některé černé uzly, ale jsou v něm i uzly červené. Poloměr rovinné service area musí být zmenšen a to až do té míry, dokud nebude obsahovat výhradně černé uzly.



Obr. 13: Vztah grafových a geodetických vzdáleností  
(Zdroj: vlastní zpracování)

V tomto místě je třeba začít přesně rozlišovat popisované objekty. Musíme začít odlišovat service area v modelu grafu  $SA_g$  založenou na uzlech a hranách od hledané service area  $SA_m$  založenou na meshi. Množinu bodů  $SA_g$  máme, množinu bodů  $SA_m$  hledáme. Navíc si musíme uvědomit, že service area obecně je množina bodů vztahující se vždy k nějakému konkrétnímu bodu definujícímu její střed. Tento bod jsme nazvali kořenovým uzlem v případě  $SA_g$  a můžeme jej nazvat středem (kruhové oblasti) v případě  $SA_m$ . Zmíněný definující středový bod můžeme pro  $SA_g$  i  $SA_m$  ztotožnit a označit jej  $c$ . Takové ztotožnění lze udělat proto, že nadále budeme uvažovat pouze konečnou množinu přípustných středových bodů  $C$ , pro kterou platí  $C = V$ , tzn. přípustné středové body  $SA_m$  jsou právě a jen uzly grafu  $G(V, E)$  v grafovém modelu poptávky.

Jak bude z nadcházející argumentace zřejmé, s jedinou service area bychom si pro definici hledaného poloměru  $SA_m$  nevystačili. Zavedme proto již nyní horní index  $i$  pro rozlišení jednotlivých service area vztahujících se vždy k jinému středovému bodu. Tím dostaneme  $SA_g^i$ , resp.  $SA_m^i$  jakožto konkrétní service area s kořenovým uzlem, resp. středem v  $c^i$ . Zároveň rozlišme metriku vzdálenosti v grafovém modelu a v modelu typu



mesh. Vzdálenost mezi dvěma uzly v grafu označme  $d_g(x, y)$  a připomeňme, že je dána jako délka nejkratší cesty mezi těmito dvěma uzly. Vzdálenost mezi dvěma body v meshi označme  $d_m(x, y)$  a uveďme, že je dána jako euklidovská vzdálenost (v případě abstraktního příkladu roviny), nebo přesněji jako geodetická vzdálenost (v případě aplikace na reálnou silniční síť).

Nyní formálně definujme  $SA_g^i$  dle rov. 10, přičemž můžeme vidět, že na obr. 13 ji znázorňuje množina černých uzlů. Množinu červených uzlů pak nazvěme doplňkem  $SA_g^i$ , označme ji  $\overline{SA_g^i}$ , a definujme podle rov. 11. Nyní uvažujme, co musí splňovat  $SA_m$ . Musí jít o oblast, ve které existují pouze samé černé uzly, tedy kde neexistuje ani jeden červený uzel. Zároveň se musí jednat o oblast kruhovou, tedy vymezenou vzdáleností  $d_m$ . Hledáme tedy maximální kruh, který neobsahuje červené body, tj. hledáme maximální poloměr  $r_{max}$  takového kruhu. Abychom ho získali, musíme hledat naopak minimální doplněk takového kruhu, který bude obsahovat všechny červené uzly, tj. hledáme vzdálenost nejméně vzdáleného červeného bodu  $\bar{x}$  od středu kruhu  $c$  podle metriky  $d_m$ . Problém je, že každá dvojice  $SA_g^i$  a  $SA_m^i$  může mít tuto vzdálenost jinou. Podmínka však musí zajišťovat, aby všechny body všech  $SA_m^i$ ,  $i \in C$  byly dostupné z  $c^i$ . To znamená, že tato vzdálenost musí být nejmenší přes všechny body a všechny service area. Tuto skutečnost zachycuje rov. 12. Vymezení service area v modelu mesh  $SA_m^i$  je pak dáno rov. 13 a znázorněno na obr. 13 jako modrá oblast. Povšimněme si, že jednotlivé  $SA_m^i$ ,  $i \in C$  jsou všechny kruhové a mají stejný poloměr, tedy jsou stejně velké. Liší se pouze polohou definovanou svým středem, na rozdíl od  $SA_g^i$ , které měly i jinou mohutnost.

$$\forall x \in SA_g^i: d_g(x, c^i) \leq d_{max} \quad \text{Rov. 10}$$

$$\forall \bar{x} \in \overline{SA_g^i}: d_g(\bar{x}, c^i) > d_{max} \quad \text{Rov. 11}$$

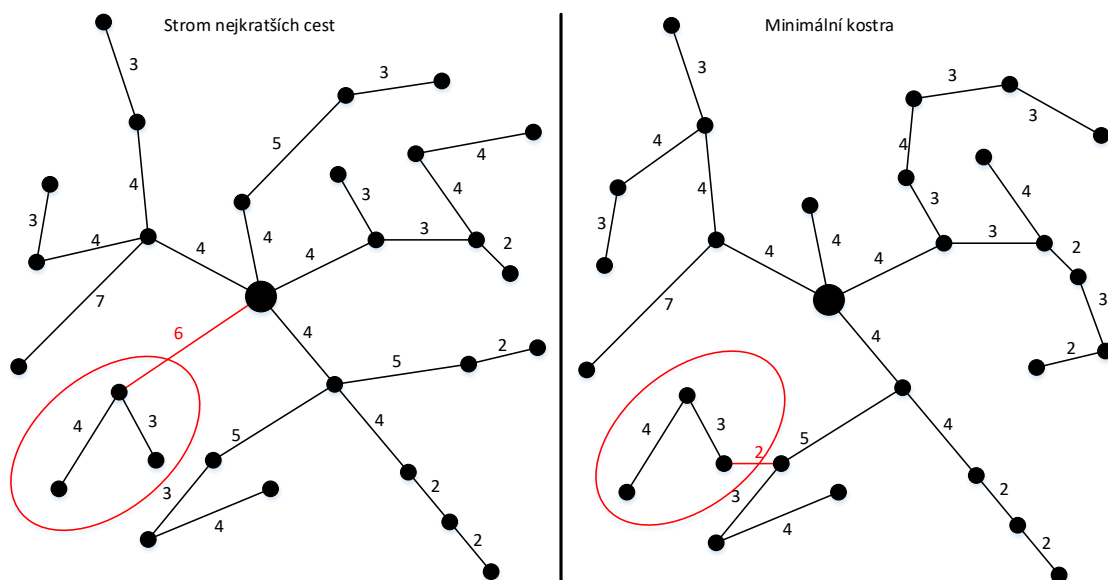
$$r_{max} = \min_{i \in V} \left( \min_{\bar{x} \in \overline{SA_g^i}} (d_m(\bar{x}, c^i)) \right) \quad \text{Rov. 12}$$

$$\forall i: \forall y \in SA_m^i: d_m(y, c^i) < r_{max} \quad \text{Rov. 13}$$

$$\overline{SA_g^i} = V \setminus SA_g^i \quad \text{Rov. 14}$$

Než přejdeme ke stanovení konkrétních hodnot  $r_{max}$  pro reálnou silniční síť ČR, uveďme ještě několik závěrečných poznámek ohledně použitých grafových algoritmů. V kapitole 6.1.2 bylo krátce zmíněno, že pro stanovení  $SA_g^i$  je potřeba vypočítat tzv. strom nejkratších cest mající kořen v uzlu  $c^i$ . Výše v této kapitole byl detailně vysvětlen důvod tohoto tvrzení a výpočty stojící za ním. Nicméně stále mohou existovat určité pochyby, proč je nutné použít právě algoritmus pro výpočet stromu nejkratších cest. Jak literatura uvádí [193], podobné algoritmy jsou například algoritmus prohledávání do šířky nebo algoritmus pro nalezení minimální kostry grafu. Uveďme, že algoritmus prohledávání do šířky (tzv. breath-first search) sice rovněž konstruuje strom nejkratších cest, nicméně je

primárně určen pro neohodnocený graf. Algoritmus nalezení minimální kostry grafu sice pracuje s ohodnoceným grafem, minimální kostra grafu však není obecně ani stejná ani isomorfní se stromem nejkratších cest v tomto grafu a to proto, že jejich množiny hran se mohou lišit. Příklad takové situace je uveden na obr. 14, kde jsou zobrazeny příklady stromu nejkratších cest a minimální kostry grafu sestavené z původního grafu na obr. 13. Oba algoritmy sice připouští, že nalezené podgrafy nemusí být unikátní (může existovat více různých stromů nejkratších cest i více různých minimálních koster), nicméně červeně vyznačená situace na obr. 14 jasně ukazuje, že alespoň v uvedeném případě se výsledky dvou porovnávaných algoritmů budou lišit. Důvod je ten, že algoritmus minimální kostry odstraňuje primárně hrany s vysokým ohodnocením, kdežto algoritmus nejkratší cesty odstraňuje takové hrany, které neleží na některé z nejkratších cest vedoucím od kořenového uzlu k ostatním uzlům grafu. Tyto hrany ale nemusí mít nutně vysoké ohodnocení, jak ukazují vyznačené hrany na obr. 14.

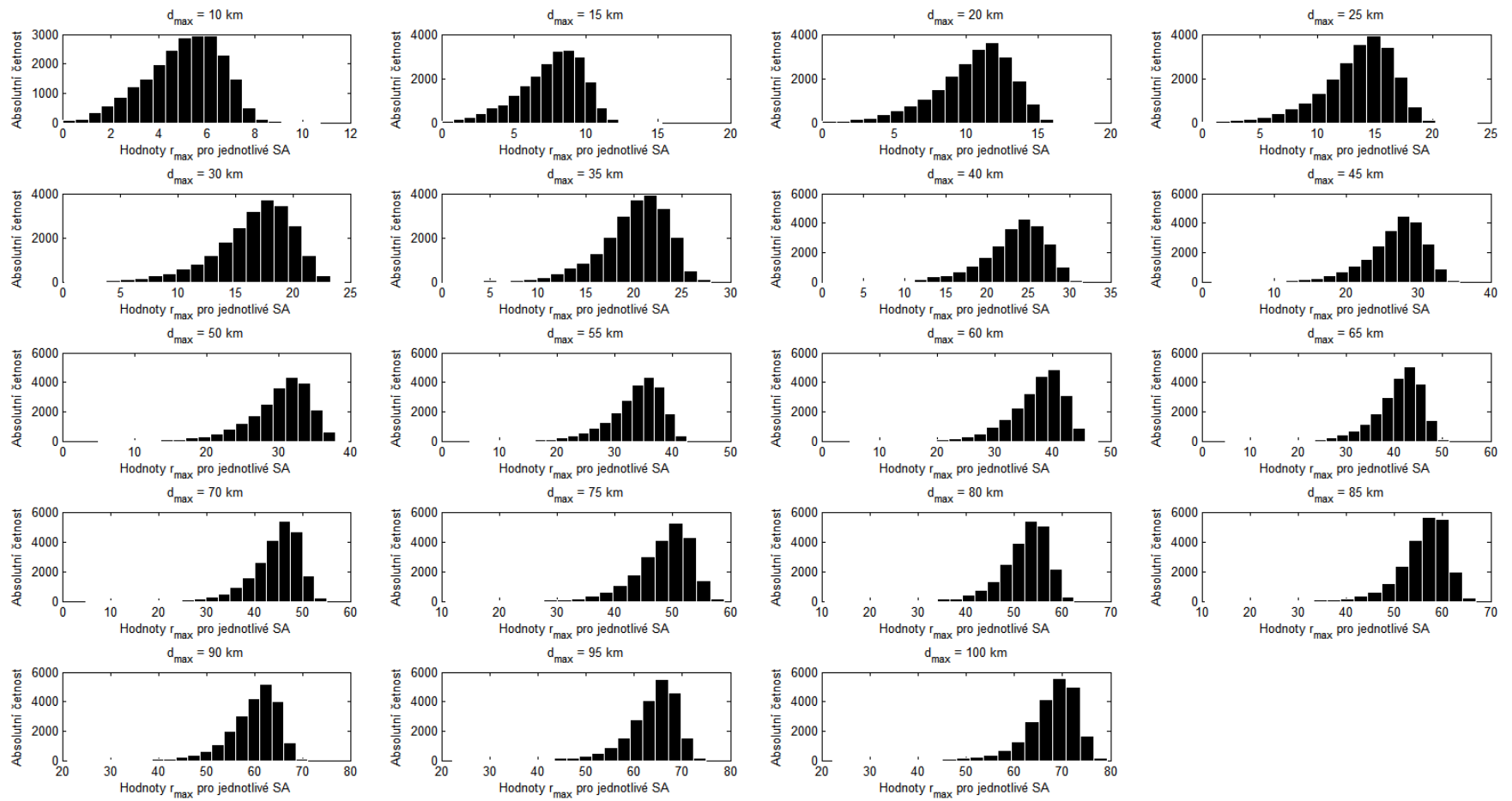


Obr. 14: Srovnání stromu nejkratších cest a minimální kostry grafu  
(Zdroj: vlastní zpracování)

## 6.2.2 Výpočet parametrů transformace

Pro reálnou silniční síť ČR je třeba vypočítat parametr  $r_{max}$  z rov. 12. Pro každý střed service area, tedy bod  $c^i$ , nejprve stanovíme  $SA_g^i$ , tedy množinu uzlů, které do této service area patří. Ty nalezneme tak, že vypočteme strom nejkratších cest od  $c^i$  ke všem ostatním uzlům a aplikujeme podmínku maximální přípustné vzdálenosti  $d_g \leq d_{max}$  z rov. 10. Tyto uzly můžeme označit jako černé dle obr. 13. Následně nalezneme množinu červených uzlů podle rov. 14, stanovíme pro všechny její prvky vzdálenost  $d_m$  a určíme minimum z těchto vzdáleností. V této chvíli je potřeba být obezřetný s terminologií. Dle definice z rov. 12 a rov. 13 nelze tvrdit, že nalezená hodnota minima je  $r_{max}$ . Jde pouze o dílčí  $r_{max}$ , platné pro jediný uzel  $c^i$ , resp. jedinou service area. Hodnoty této dílčí  $r_{max}$  jsou pro všechny uzly  $V$  uvedeny jako histogram na obr. 15 v kategoriích pro proměnlivou hodnotu  $d_{max}$ . Je zřejmé a z obrázku i patrné, že při zvětšující se hodnotě

$d_{max}$  se zvyšují hodnoty dílčích  $r_{max}$  (vrchol histogramu se posouvá doprava). Jak ale z těchto proměnlivých hodnot určit finální hodnotu  $r_{max}$  platnou pro všechny service area? Lze striktně použít podmínku z rov. 12?



Obr. 15: Dílčí hodnoty  $r_{max}$  pro jednotlivé service area  
(Zdroj: vlastní zpracování, MATLAB)

Tab. 4: Vybrané hodnoty  $r_{max}$  podle vztahu z rov. 12

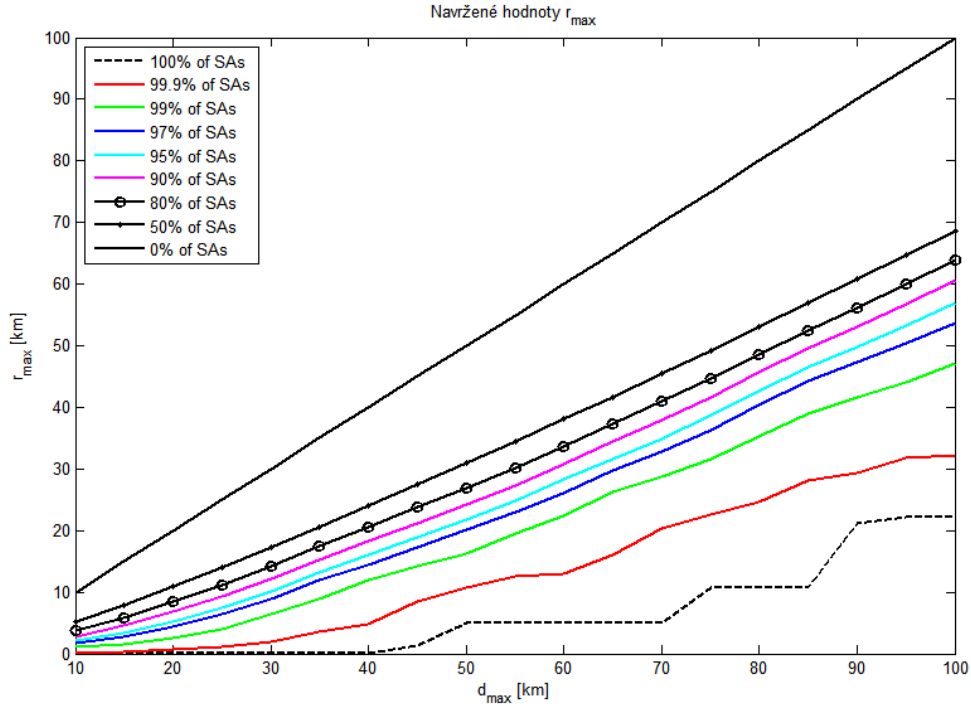
$d_{max}$	10 km	20 km	30 km	40 km	60 km	80 km	100 km
$r_{max}$	0,015 km	0,060 km	0,188 km	0,188 km	4,935 km	10,792 km	22,248 km

(Zdroj: vlastní zpracování)

Při bližším pohledu zjišťujeme, že situace se pro skutečná data mírně komplikuje. Pokud bychom chtěli skutečně aplikovat vztah rov. 12 jakožto jediný rozhodovací faktor, pak bychom zjistili, že meshem definovaná service area  $SA_m$  je oproti původní grafem definované  $SA_g$  podstatně menší. Tab. 4 uvádí její hodnoty, kde je jasně vidět, že navrhovaná hodnota  $r_{max}$  je zejména pro nižší hodnoty  $d_{max}$  zcela nerealistická. Pro  $d_{max} \leq 40$  km je situace v případě striktního dodržení podmínky z rov. 12 zcela jasná – navrhovaná  $SA_m$  by měla takřka nulový obsah. Pro  $40 \text{ km} < d_{max} \leq 100$  km je situace mírně lepší, ale i v tomto případě je navrhovaná  $SA_m$  jen zlomkem původní  $SA_g$ .

Východiskem může být přehodnocení významu podmínky rov. 12, zejména pak připomenutí důvodu, proč tuto podmínku zavádíme. V kapitole 4.4.3 definující pojem service area je uvedeno, že musí jít o takovou oblast, ve které je možné pohybovat se elektromobilem s dojezdovou vzdáleností  $R$  bez obavy, že nebude možné vrátit se k nabíjecí stanici ležící v jejím středu. Vzdálenost  $R$  má být dojezdová vzdálenost vozidla s nejnižší dojezdovou vzdáleností, které se vyskytuje v dané oblasti. Už samotné vymezení vozidla vyskytujícího se v oblasti je dosti vágní a můžeme různě polemizovat, jak taková vozidla definovat přesněji. Této polemiky však nyní zanechme a zaměříme se na jádro sdělení. To říká, že každá service area je oblast maximálně tak velká, aby všechna, případně většina vozidel měla možnost dosáhnout všech bodů této oblasti, aniž by byla ohrožena schopnost vozidla vrátit se k nabíjecí stanici ve středu oblasti. To je zbytečně silná podmínka kladená na service area už proto, že pro vozidla je analogická podmínka intuitivně slabší. Říkáme a v příslušné kapitole argumentujeme, že nemusí jít o striktně všechna vozidla, připustíme tedy, že podmínku vzdálenosti  $r_{max}$  musí splňovat jen většina service area.

Nyní je potřeba definovat co se má rozumět pojmem většina. Použijme obr. 15 a stanovme hodnoty  $r_{max}$  pro různé velké soubory hodnot, pro které bude platit, že obsahují postupně 100 %, 99,9 %, 99 %, 97 %, 95 %, 90 %, 80 %, 50 % a referenčních 0 % z celkového počtu service area. Výsledky pro různé hodnoty  $d_{max}$  různě velké soubory znázorňuje obr. 16. Můžeme pozorovat, že původní podmínka z rov. 12 odpovídá 100 % SA a znázorňuje ji přerušovaná černá křivka ve spodní části grafu. Zároveň vidíme, že už při zanedbání 0,1 % celkového počtu SA se navrhovaná hodnota  $r_{max}$  takřka zdvojnásobuje oproti 100 % variantě. Pokud se posuneme na 99 %, hodnoty  $r_{max}$  se opět výrazně zvyšují. Další posun až na 95 % už nepřináší významnější změnu v  $r_{max}$ , ale stále je možné ho uvažovat, jelikož obětujeme relativně malý podíl (dodatečně 4 %) celkového počtu SA. Z obrázku je zřejmé, že další posuny už nemají smysl, téměř nezvýší hodnotu  $r_{max}$ , tudíž zde hledání optimální hodnoty tohoto parametru končí. Můžeme konstatovat, že přijatelná „většina“ je někde v rozmezí 95–99 %. Autor se osobně přiklání k hodnotě 95 % z prostého důvodu sjednocení míry nejistoty napříč celou prací. Kdekoliv je totiž v práci použito statistických měření, pracuje se s hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ .



Obr. 16: Navržené hodnoty  $r_{max}$  pro různé hodnoty  $d_{max}$  a pro různé zastoupení podílu service area  
(Zdroj: vlastní zpracování, podle `examineRmax.m`)

Závěrem této kapitoly lze tedy konstatovat, že byly empiricky zjištěny parametry transformační funkce  $\psi$ , která stanovuje hodnotu  $r_{max}$  pro určitou hodnotu  $d_{max}$  na hladině přesnosti  $\omega$ , což je podíl celkového počtu SA, který považujeme za *většinu* splňující podmínku rov. 12. Ostatně obr. 16 znázorňuje příklady takových funkcí s různými parametry. Protože transformace byla empiricky zjištěna pro všechny SA, resp. pro přesně definovanou většinu danou podílem  $\omega$ , můžeme opustit rov. 11 a rov. 12, jejichž účelem byla definice vztahu mezi  $d_{max}$  a  $r_{max}$ . Místo toho lze použít rov. 15, přičemž z předchozí argumentace plyne, že volíme  $\omega = 0,95$ . A protože při ní platí stejně jako v rov. 12, že hodnota  $r_{max}$  je identická pro všechny uvažované SA, pak platí i definice SA z rov. 13, kterou netřeba znovu vypisovat.

$$r_{max} = \psi(d_{max}, \omega) \quad \text{Rov. 15}$$

Výsledkem je tedy skutečnost, že při znalosti vzdálenosti  $d_{max}$ , kterou známe z grafové reprezentace SA, můžeme jednoznačně určit vzdálenost  $r_{max}$  používanou v reprezentaci meshem, přičemž zároveň známe přesnost této transformace, jež je dána hodnotou parametru  $\omega$ .

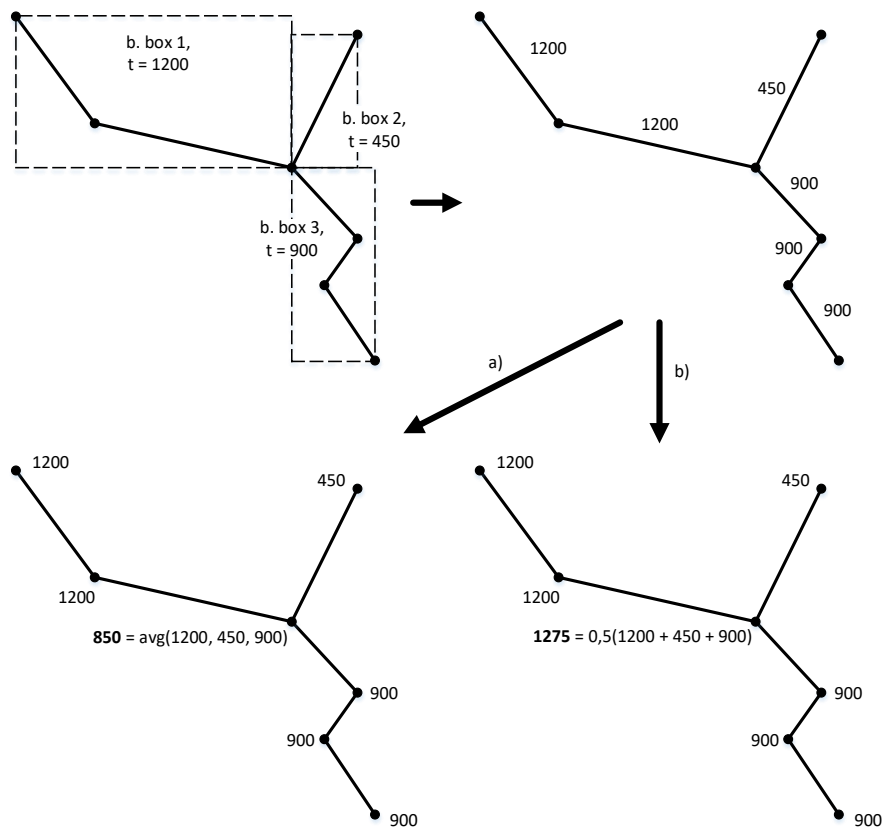
### 6.3 Revidovaný model poptávky

Finální verze modelu poptávky je založena na využití dat o hustotě dopravy [140] a koncipována jako mesh model splňující podmínky transformace z předchozí kapitoly 6.2.

Model je rozdělen do dvou částí. První pojednává o rozložení poptávky v prostoru a pracuje výhradně s veličinou statické intenzity dopravy. Druhý pojednává o rozložení poptávky v čase a pracuje s intenzitou dopravy během dne, vývojem poptávky v čase a návazností modelu poptávky na simulátor nabíjení. V předchozích pracích byly uvažovány i alternativní architektury modelu poptávky [106] [190], nebylo však prokázáno, že jejich přínos vyvažuje problémy spojené s jejich implementací.

### 6.3.1 Prostorový model poptávky

Surový datový soubor popisující dopravu v ČR obsahuje data ve formátu ESRI shapefile [194]. Hodnoty dopravy jsou uloženy pro jednotlivé úseky definované pomocí tzv. *bounding box*. Ten je popsán dvěma dvojicemi souřadnic vymezujících jeho geografickou polohu. Každý bounding box má k sobě přiřazenu mimo jiné množinu uzlů, které obsahuje, typ geometrie, který popisuje (jedná se o typ Line), jednu statistiku dopravy v tomto boxu a souřadnicové body vymezující jeho velikost a polohu. Jeden box může obsahovat více definovaných dopravních uzlů, resp. hran, přičemž pro všechny pak platí jediná metrika dopravy. Přibližná situace je demonstrována na obr. 17, kde výchozí stav vlevo nahoře popisuje formát ESRI shapefile, kde hodnota hustoty dopravy  $t$  je definována pro každý bounding box. Situace vpravo nahoře popisuje převod z bounding boxu na hranově definovanou hustotu dopravy, tzn. každá hrana v bounding boxu získá vlastní odpovídající hustotu dopravy. Diagramy vlevo a vpravo dole demonstrují možné transformace hranově definované hustoty dopravy na uzlově definovanou hustotu dopravy. Transformace a) vlevo dole je prostým aritmetickým průměrem hustot dopravy na hranách incidujících s daným uzlem a má tu výhodu, že vyhlazuje rozdíly mezi hustotami dopravy na sousedních hranách, byť za cenu mírné ztráty realističnosti. Transformace b) vpravo dole vychází z argumentace v článku [190], resp. z kapitoly 6.1.1 a je svým způsobem realističtější, avšak znatelně upřednostňuje křižovatky, tj. uzly stupně vyššího než 2.



Obr. 17: Převod hodnoty dopravy z shapefile formátu na uzlově definovanou dopravu (Zdroj: vlastní zpracování)

Z původního počtu přibližně 8300 bounding boxů je takto získáno přibližně 44400 uzlů, pro které je stanovena hodnota hustoty dopravy. Aktuálně používaný způsob transformace je typu a), tj. průměrování hodnot, který je však lehce nahraditelný za b) v případě, že by se typ a) nejevil jako vhodný. Uvedme, že při konstatování počtu uzlů a bounding boxů záměrně zaokrouhlujeme, z čehož plyne vědomé užívání slůvka „přibližně“. Je to proto, že přesné hodnoty se mohou z různých důvodů měnit. Například bude-li někdy databáze aktualizována, počet bounding boxů, případně uzlů v nich může být mírně odlišný (původních bounding boxů v datech z roku 2010 bylo o několik desítek více než v datech z roku 2016). Další důvod je, že v datech se vyskytují chyby různého rázu – chybějící hodnoty, sémanticky nesprávné hodnoty, prvky, které nesplňují určité podmínky, např. v některých úlohách striktně požadujeme souvislost grafu. Tu ovšem některé uzly v datové množině (řádově jde o jednotky uzlů) nesplňují, tedy nelze z nich například najít cestu do ostatních uzlů. Takové prvky datové množiny proto musí být vyloučeny, což by způsobovalo zmatky v uváděné velikosti datové množiny. Ostatně přesná velikost datové množiny není příliš důležitá, postačí informace o její řádové velikosti.

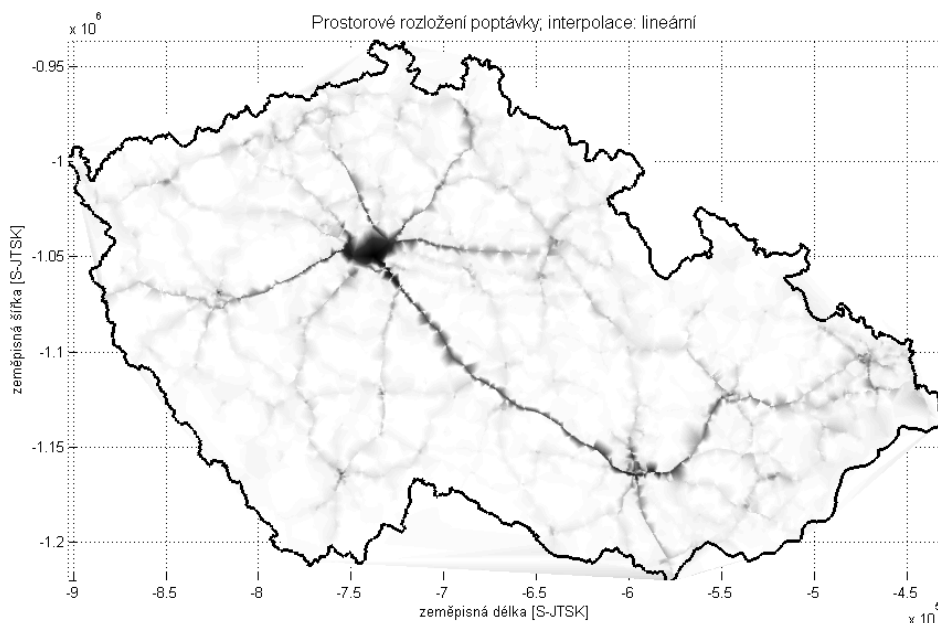
Z takto získaných uzlů se vytvoří mesh mřížka pomocí tzv. 2-D scattered interpolation, což je dvojrozměrná interpolace použitelná pro rozptýlená (neekvidistantní) data. Výstupem této interpolace je funkce dvou proměnných, tj. zeměpisných souřadnic polohy – šířky a délky. Funkce může být různého typu podle použité metody interpolace. Z dostupných



metod byla vybrána metoda lineární, která data aproximuje poměrně uspokojivě. Její chování je rozhodně lepší než u další zvažované metody nejbližšího souseda, kdy docházelo k nerealistickému pokrývání velkých územních ploch konstantní hodnotou. Pro pokročilejší metody naopak není v aplikaci odůvodnění (týká se např. metody kubického polynomu, případně metody kubických splinů).

Interpolační funkci poté aplikujeme na defaultní mesh mřížku, což je matice určitých rozměrů, která bude následně reprezentovat popisovanou oblast. Velikost a hustota mřížky jsou libovolné, chceme jí však pro popis ČR, proto volíme hraniční body ČR jako ukotvení a ohraničení (severní, jižní, východní a západní extrémní souřadnici v datech). V kapitole 6.2.1 jsme argumentovali pro zvolení modelu typu mesh proto, abychom mohli libovolně volit mezi přesností modelu a jeho výpočetní a paměťovou náročností. Volbou hustoty mřížky provádíme přesně toto. Pro model ve výchozím nastavení je zvolena mřížka o velikosti 2500 x 1500 prvků, což odpovídá při rozměrech ČR přibližně 500 x 300 km hustotě mřížky zhruba 200 m. To znamená, že povrch ČR je rozdělen na čtverce o hraně 200 m, přičemž každému čtverci je přidělena právě jedna hodnota, jež vychází z hustoty dopravy.

Nyní se dostáváme ke slabému místu modelu. Do této chvíle jsme mluvili o hodnotách v popisovaném modelu jako o hodnotách hustoty dopravy. Hustota dopravy je samozřejmě veličina, kterou lze definovat pouze na silničních úsecích v rámci silniční sítě. Mimo silniční síť jaksi postrádá smysl. V článkách [190] [105] [132] byly diskutovány možné různé pohledy na hlavní zkoumanou veličinu – poptávku po veřejné nabíjecí službě. Byly zváženy různé pohledy na problematiku, různé veličiny, která by ji mohly potenciálně ovlivňovat, byla zvážena dostupnost a kvalita dat pro ČR, byl zvážen vývoj veličiny poptávky v čase a její provázanost s nabídkou. Tyto úvahy se odehrály v rozmezí 3 let, přičemž definovaly současnou podobu modelu. Podstatné je, že v těchto úvahách byla postupně zamítnuta většina faktorů, které měly mít domnělý vliv na poptávku po nabíjecí službě, tedy které měly figurovat v tomto jejím modelu. Z faktorů nakonec zbyla pouze doprava, resp. její stav z prostorového a časového hlediska, a některé neproměnlivé konstanty.



Obr. 18: Prostorové rozložení poptávky po nabíjecí službě v ČR  
(Zdroj: vlastní zpracování)

V následujícím výkladu proto můžeme ztotožnit vypočtený mesh model dopravy s prostorovým, v čase neproměnlivým modelem poptávky po nabíjecí službě. Grafická reprezentace modelu je na obr. 18, kde vidíme vysoké hodnoty poptávky zejména na významných dopravních tepnách a v okolí větších měst (tmavší barva znamená vyšší hodnoty). Tato skutečnost není ničím překvapivým, vždyť model pouze kopíruje model dopravy. Rozdíl je však v tom, že hodnotu poptávky máme definovanu i mimo silniční síť. Celý povrch ČR uvnitř hranic je vyplněn mesh sítí, v jejíž buňkách je definována nenulová poptávka. Pochopitelně, ve světlejších místech mimo silniční komunikace je výrazně nižší než na těchto komunikacích, ale důležité je, že i tam je nenulová. To lze reálně chápat tak, že pro uživatele elektromobilů neexistuje v ČR místo, kde by potenciální nabíjecí službu zcela odmítali (v takovém místě by totiž byla poptávka nulová). Naopak ve velmi tmavých místech je potenciální nabíjecí služba vysoce preferovaná.

Závěrem uveďme ještě jednu poznámku vztahující se k následující kapitole o časovém aspektu poptávky. V dokumentu [195], který bude níže podrobněji diskutován, jsou uváděny různé tzv. přepočtové koeficienty pro různé typy pozemních komunikací (dálnice, rychlostní silnice, silnice 1 až 3. třídy apod.). Tyto přepočtové koeficienty nás z prostorového aspektu nemusí zajímat – používané hodnoty hustoty dopravy na jednotlivých silničních úsecích jsou už hodnoty finální, přepočtené.

### 6.3.2 Časový model poptávky

Zkoumat poptávku z časového hlediska vyžaduje poněkud odlišný přístup. Pokud by existovala veřejně dostupná statistika pohybu reprezentativního vzorku vozidel na elektrický pohon, jejich polohy, času odjezdu, času příjezdu, délky pobytu na určitém

místě a účelu cesty, pak bychom nemuseli pojednávat o prostorovém a časovém hledisku odděleně. Mohli bychom navrhnout jediný model reprezentující výskyt vozidla v daném čase a místě přímo z primárních dat, dokonce bychom věděli, jak často jsou elektromobily nabíjeny, kde a kdy se to děje. Bohužel pro ČR je kvalita dat minimálně o dvě třídy nižší. O dvě třídy proto, že v kvalitě dat lze rozpoznat dva stupně. Lze uvažovat tzv. origin-destination (OD) data, jež se běžně ve výzkumech dopravy používají, ovšem které pojednávají o osobní dopravě obecně. Příkladem takových dat je mnohokrát zmiňovaná databáze NHTS [139] platná pro Spojené státy, alternativně třeba HITS [134] platný pro Singapur. Data této povahy ovšem pro ČR dostupná nejsou, přičemž je dost pravděpodobné, že v požadované kvalitě ani neexistují. Druhým kvalitativním stupněm jsou OD data nejen obecně o všech osobních silničních vozidlech, ale data výhradně zaměřená na PEV. Není důvod se totiž domnívat, že uživatelé používají PEV obecně zcela stejným způsobem jako používají ICEV. Pokud by existovala statistika zvláště pro každý z těchto typů, pak by mohla být hypotéza o rozdílnosti ve způsobu použití potvrzena nebo vyvrácena. Naneštěstí nedostatečná kvalita dat neumožňuje ani jedno.

Z uvedených důvodů si musíme vystačit pro ČR s daty, která spolu přímo nesouvisí, která pojednávají o problému z různého úhlu pohledu. Proto máme zvláště data o prostorovém a zvláště o časovém rozložení dopravy, tedy v našem zjednodušeném modelu – o časové a prostorové poptávce. Časové rozložení navíc můžeme rozdělit na *krátkodobé periodické* a *dlouhodobé trendové*.

### **Krátkodobé periodické časové rozložení poptávky**

Krátkodobý periodický časový aspekt představuje rozložení poptávky během dne, týdne, případně roku. Jde o výkyvy způsobené denní dobou, dnem v týdnu, ročním obdobím. Je vcelku evidentní, že v různou denní dobu bude poptávka po nabíjení různá. Přes den bude podstatně vyšší než v noci, v ranních a odpoledních hodinách bude vyšší než v poledne. To dokazuje nespočet vědeckých prací na optimalizaci zátěže, kterou kladou nabíjené elektromobily na přenosovou síť, viz kap. 2.5. Rovněž je poměrně zřejmé, že tyto denní výkyvy se budou lišit v běžný pracovní den a o víkendu. Odlišnost chování běžného člověka (zaměstnaný či podnikající člen nižší až střední třídy) v pracovní den a o víkendu je opět evidentní a netřeba ji dokazovat. Rozdíly této periodicity mohou existovat i v rámci ročního období. Můžeme argumentovat, že minimálně v letních měsících se bude agregované nabíjecí chování lišit od zbytku roku, ať už rozdíl bude způsoben počasím (lidé se více dopravují pěšky a na kole), obdobím dovolených (lidé si berou letní volno), nebo absencí školní docházky (neprobíhá přesun dětí ve věku 4–18 let do vzdělávacích zařízení).

Jistou představu o periodicitě v dopravě obecně (bez vztahu k elektromobilitě) lze získat z [195]. Dokument popisuje metodiku sběru dat o dopravě na silničních komunikacích, definuje názvosloví, sbírané parametry a způsob stanovení dopravních veličin. Uvádí použití přepočtových koeficientů, jejichž účelem je zachytit variabilitu dopravy na různých dopravních úsecích. Ty mohou být různého typu z hlediska třídy komunikace, intenzita dopravy může být sledována v různou denní dobu, v různé roční období, pro

různé typy vozidel. Přínosem je, že tyto koeficienty samy o sobě vypovídají o periodických rozdílech v dopravě.

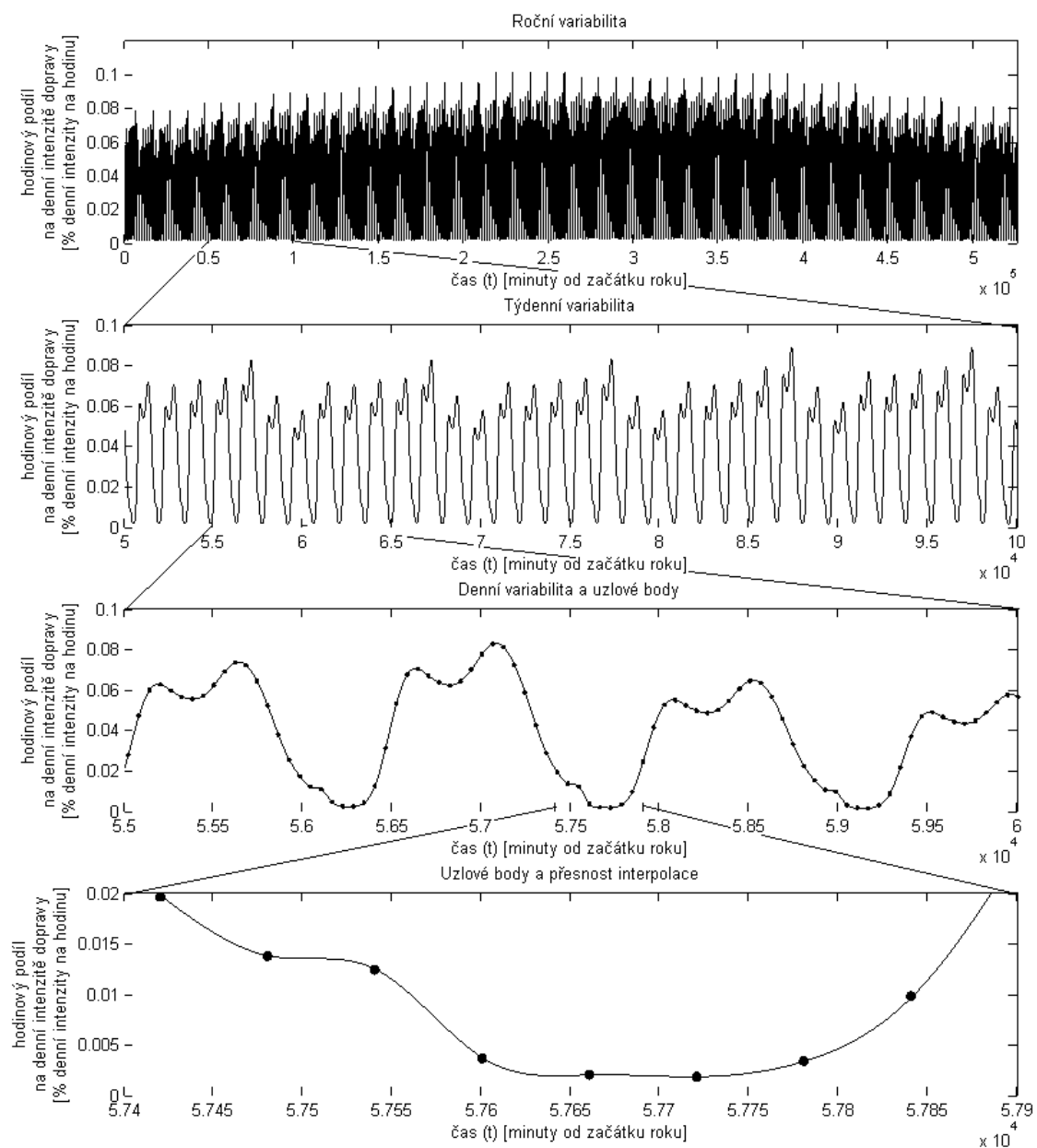
Nejvýraznější periodickou složkou je samozřejmě denní cyklus. Variace intenzit dopravy během dne v různé roční období, pro různé typy vozidel a různá kategorie pozemních komunikací jsou zachyceny v přílohách 2.1 až 2.6 dokumentu [195]. Z hlediska elektromobility nás bude zajímat zejména kategorie osobních vozidel. Z časového hlediska nás naopak nebude zajímat typ pozemní komunikace. Z tabulky zbývá variabilita intenzity dopravy během dne (identifikujeme každou z 24 hodin) kategorizovaná podle období v roce (identifikujeme 4 různá období v roce). Uveďme, že období roku nejsou identická s kalendářními ročními obdobími, v kapitole 4.1.3 dokumentu [195] je uvedena jejich definice. Variace dopravy během dne je nejvýznamnější, ale není jediná. V příloze 4.1 dokumentu [195] najdeme týdenní variace intenzit dopravy. Zajímají nás koeficienty pro osobní vozidla, opět kategorizovaná podle období v roce a podle typu komunikace. Typ komunikace opět netřeba rozlišovat. Identifikujeme 7 různých dní pro 4 kategorie období v roce. Vedle týdenní variace je další složkou roční perioda. Jde o nejdelší periodu ve variabilitě intenzity dopravy a její hodnoty pro případ osobních vozidel jsou uvedeny v příloze 5.1 dokumentu [195]. V tabulce roční variability identifikujeme 12 měsíců a hodnoty jsou uvedeny pro různé typy pozemních komunikací a provozů, přičemž ty nás opět nezajímají.

Jestliže jednotlivé časové složky vycházející z uvedených koeficientů skloubíme dohromady, dostaneme variabilitu intenzity dopravy během celého roku s přesností na hodiny. Pomocí interpolace můžeme graf vyhladit a získat přesnost až na minuty. Časový model poptávky je totiž velmi těsně propojen s navrženým simulátorem interakce mezi nabíjecími stanicemi a vozidly, o kterém pojednává kapitola 8. Tam se pracuje s příjezdem vozidla ke stanici s přesností na minuty, protože nejrychlejší nabíjecí stanice jsou schopny nabít vozidlo během 30 až 120 minut v závislosti na jeho kapacitě; hodinové měřítko je zjevně pro takový účel příliš hrubé. Proto je vhodné pracovat s minutami už i zde.

Celkový průběh intenzity dopravy lze považovat za funkci jediné proměnné a to času. Nemá smysl funkci formálně definovat, jelikož o ní není známo víc než to, že se skládá ze tří periodických složek popsaných výše – denní, týdenní a roční. Funkce byla za účelem interpolace pochopitelně definována, nicméně protože je použito  $365 \cdot 24 = 8760$  uzlových bodů, data silně a nepravidelně oscilují. Protože interpolujeme metodou splinů, tak výsledný zápis funkce by byl příliš rozsáhlý pro prezentaci, přičemž by neposkytl žádnou informaci zásadního rázu. Mnohem vhodnější je zde použít grafické znázornění funkce, přičemž se zaměříme zejména na jednotlivé periodické složky.

Ty jsou na obr. 19 znázorněny postupně jako první tři grafy. Čtvrtý graf znázorňuje přesnost interpolace pomocí proložení uzlových bodů interpolovanou funkcí. Na prvním grafu obrázku je znázorněn průběh funkce v rámci celého roku. Hodnoty na vodorovné ose jsou v minutách od začátku roku, celý graf obsahuje  $8760 \cdot 60 = 525600$  hodnot, což znemožňuje vidět detaily. Lze na něm však spatřit mírné výkyvy během roku

způsobené roční periodickou složkou, kdy přibližně uprostřed roku, zejména v letních měsících, je doprava mírně vyšší než průměr. Druhý graf je výřezem a přiblížením části prvního, přičemž je na něm viditelná týdenní periodická složka. Jasně je vidět přibližně stejná úroveň dopravy během pondělí až čtvrtek, nejvyšší úroveň během pátku a pak dvě nízké hodnoty během víkendu. Tento cyklus se opakuje během celého roku, ovšem v různých obdobích roku má odlišný průběh a intenzitu. Tato období roku jsou: 1) jarní (duben, květen, červen), 2) prázdninové (červenec, srpen), 3) podzimní (září, říjen, listopad), 4) zimní (prosinec, leden, únor, březen). Třetí obrázek je dalším přiblížením druhého a znázorňuje denní variabilitu intenzity dopravy. Jednoznačně vidíme, že denní složka je nejsilnější a lze na ní jasně identifikovat dva vrcholy – ranní a odpolední. Rovněž vidíme přirozený pokles dopravy v pozdních nočních až brzkých ranních hodinách. Detailnější popis denní složky lze nalézt v kapitole 8.2, kde je popsán význam funkce časové variability v generátoru diskretních událostí, což je část simulace interakce vozidel s nabíjecími stanicemi.



Obr. 19: Časová variabilita poptávky – jednotlivé složky  
(Zdroj: vlastní zpracování, sestaveno pomocí `scrFullYearDemandVariability.m`)

### Dlouhodobé trendové časové rozložení poptávky

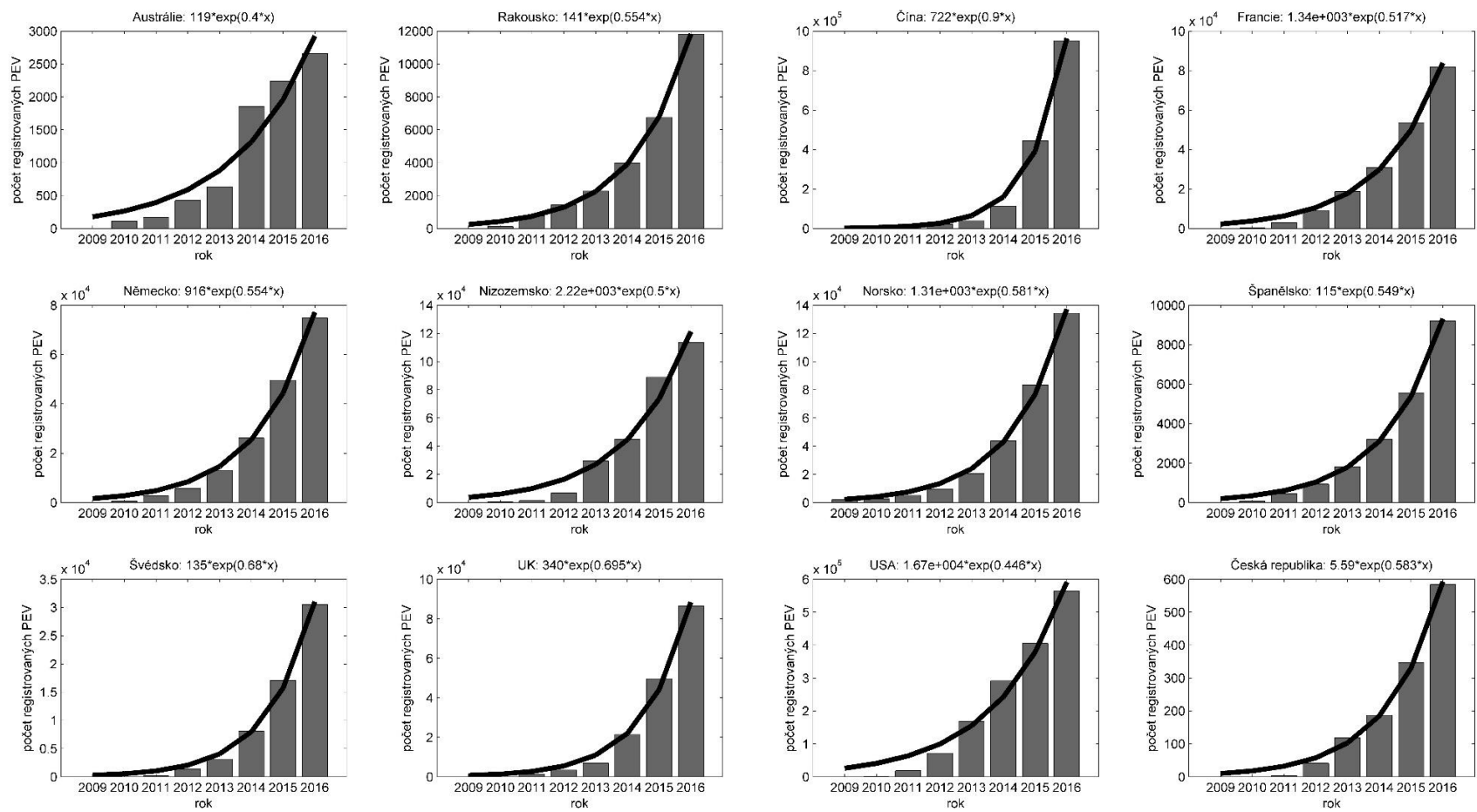
V této sekci se přesuneme od modelu periodického časového průběhu poptávky v rámci jednoho roku k modelu, který by měl zachycovat dlouhodobé trendy. Zde je třeba opustit většinu řečeného v předchozí sekci a pohlédnout na problematiku ze zcela odlišné perspektivy. Nyní nelze již hovořit o hustotě dopravy na pozemních komunikacích a nelze vztahovat skutečnosti platící pro osobní vozidla obecně na podmnožinu elektromobilů. Je nutné zaměřit se na problematiku ekonomicky, nazírat současnou situaci v elektromobilitě z pohledu trhů a jejich vývoje.

Fenomén elektromobility, resp. její masový nástup, je od svého počátku sledován jako vývoj trhů s osobními silničními vozidly v různých zemích. Nejčastěji používanými statistikami jsou statistiky výrobců vozidel, statistiky prodeje vozidel a statistiky registrace vozidel. Zde je třeba hned uvést, že se nejedná o zcela stejné veličiny, i když spolu velmi úzce souvisí. Není totiž pravdou, že ve statistice pro jeden stát a jedno časové období, nejčastěji rok, čtvrtletí či měsíc, bude stejné množství vyrobených, prodaných a registrovaných vozidel. Důvodem je časové zpoždění, tržní mechanismy (časový a prostorový nesoulad nabídky a poptávky, mezinárodní obchod) a případný nesoulad mezi místem nákupu vozidla a jeho provozováním.

Ze tří uvedených statistik nás z hlediska zkoumaného problému nejvíce zajímá statistika registrací vozidel. Důvodem je fakt, že registrace vozidla je z časového hlediska nejbližší jeho skutečnému provozu. Z prostorového hlediska je statistika registrace vozidel rovněž nejpřesnější, jelikož se předpokládá, že vozidlo se registruje v té zemi či regionu, kde bude následně provozováno. Statistiku registrace vozidel pro jednotlivé země, zejména pak vozidel na alternativní pohon, lze získat individuálně od Asociace evropských výrobců automobilů [48] pokud jde o země EU nebo vybrané evropské země. Statistiky ostatních zemí jako USA, Kanada, Čína, Austrálie apod. lze získat individuálně prostřednictvím různých místních vládních institucí. Získaná data jsou ovšem často nestejnorodá, používají různé časové jednotky, různé definice vozidel na elektrický pohon a časové řady jsou jen výjimečně dostupné v plném rozsahu. Naštěstí existují iniciativy technologických nadšenců se zájmem o elektromobilitu, kteří publikují agregované statistiky z těchto nestejnorodých zdrojů. V tomto ohledu bych oproti obecnému přesvědčení vyzdvihl zejména Wikipedii, která se ve velmi rozsáhlém článku o elektromobilitě [196] jednotlivých zemích světa snaží sjednocovat heterogenní statistiky a vytvářet tak ucelený obraz o elektromobilitě nejen v Evropě, ale ve většině vyspělých zemí světa.

$$R(t): n_t = ae^{bt} \qquad \text{Rov. 16}$$

Statistiky jednotlivých zemí byly prozkoumány, přičemž byl učiněn závěr, že vývoj tamních trhů s elektromobily je možné zachytit exponenciálním růstovým modelem  $R$  z rov. 16, kde  $n_t$  je roční počet registrovaných vozidel,  $a$  a  $b$  jsou koeficienty modelu specifické pro každou zemi a  $t$  je čas. Tato domněnka byla potvrzena pro 11 zemí s nejrozvinutějším trhem s elektromobily. Pro výběr právě 11 zemí nebyl žádný konkrétní důvod, byly vybrány takové země světa, o kterých je obecně známé, a ze statistik vyplývající, že elektromobilita je zde velmi rozvinutá. Po validaci modelu na těchto 11 zemích byl model použit na ČR a rovněž byly stanoveny jeho koeficienty, čímž byl růstový model dokončen. Validaci modelu pro 11 zemí a model pro ČR spolu se všemi koeficienty demonstruje obr. 20.



Obr. 20: Exponenciální model vývoje počtu registrací ve vybraných zemích a v ČR (Zdroj: vlastní zpracování, sestaveno pomocí mainEVmarket.m)



Vyvinutý růstový model je použit k odhadu dlouhodobého časového vývoje počtu elektromobilů na území ČR. Aktuální počet elektromobilů  $N$  v čase  $t$  se pak stanoví jako kumulativní součet registrací v jednotlivých letech z rov. 17. Dalo by se namítnout, že vztah je zjednodušen tím, že pracuje s kumulativním součtem nových registrací elektromobilů jakožto indikátorem aktivně používaných vozidel, přičemž neodečítá od tohoto množství ta vozidla, která zastarají, jsou definitivně poškozena nebo vyřazena z aktivního používání z jiného důvodu. Autor si je této skutečnosti vědom a zároveň upozorňuje, že bude-li tento model používán po roce 2020, kdy lze očekávat silící trend v zastarávání první generace elektromobilů, musí být tato skutečnost zohledněna a do modelu zapracována. Do té doby však lze s dostatečnou dávkou realističnosti tvrdit, že počet vozidel registrovaných, ale současně už postavených mimo aktivní používání, bude zanedbatelný.

$$N_t = \int_0^t R(t)dt \quad \text{Rov. 17}$$

Hodnota  $N$  tedy představuje celkový počet elektromobilů na území ČR, které potenciálně a pravidelně využívají veřejnou nabíjecí infrastrukturu. Zde je důležité slovo „potenciálně“, neboť zřejmě bude platit, že ne všech 100 % majitelů elektromobilů bude pravidelně nabíjet svoje vozidlo na veřejně dostupných stanicích. Rovněž je důležité slovo „pravidelně“, neboť je třeba zohlednit, jak často každý elektromobil infrastrukturu využívá, tzn. kolikrát týdně navštíví veřejné nabíjecí místo. Tyto statistiky pochopitelně netřeba znát individuálně pro každé vozidlo, stačí zjistit podíl vozidel využívající veřejnou infrastrukturu na celkovém počtu registrovaných vozidel a průměrnou, řekněme týdenní, frekvenci tohoto využití. Odtud pak bude plynout počet elektromobilů, které denně poptávají veřejnou nabíjecí službu. Formálně toto zachycuje rov. 18, kde  $n_t$  je diskutovaný počet,  $\varphi$  je koeficient frekvence využití veřejné infrastruktury, tj. jak často během jednoho dne využije jedno vozidlo veřejnou nabíjecí službu. Pokud například 3x týdně, pak  $\varphi = \frac{3}{7}$ . Koeficient  $\eta$  je podíl vozidel využívající veřejnou nabíjecí službu na celkovém počtu všech registrovaných elektromobilů. Tento koeficient vychází z uživatelské statistiky využití nabíjecích static podle různého typu dostupnosti (veřejné, na pracovišti, doma). Celkový počet registrovaných elektromobilů  $N_t$  pak vychází z rov. 17.

$$n_t = \eta\varphi N_t \quad \text{Rov. 18}$$

Stanovení hodnot koeficientů  $\varphi$  a  $\eta$  je nesmírně obtížné a případné nalezené číslo musí být z povahy věci při současném stavu poměrně nepřesné. Důvodu pro toto nepřilíhající optimistické tvrzení je několik. Tak především pro oba koeficienty platí, že jejich hodnota se bude lišit pro různé regiony, různé typy uživatelů, různé fáze rozvoje elektromobility v dané oblasti. Koeficienty se totiž snaží jediným číslem zachytit nesmírně komplexní jev, který je v konečném důsledku závislý na reakci jednotlivců (vlastníků elektromobilů) na měnící se prostředí. Zřejmě je racionální předpokládat, že čím nižší bude uživatelova denní ujetá vzdálenost, tím méně bude chtít nabíjet své vozidlo mimo domov. Naopak

čím rychlejší a hustší bude síť veřejných nabíjecích stanic, tím více bude uživatel motivován nabíjet mimo domov. S rostoucí velikostí baterie roste dojezd, tedy klesá potřeba nabíjet mimo domov, nicméně roste cena vozidla. Z toho ovšem neplyne, že uživatel vlastnící vozidlo s velkou kapacitou baterie nebude chtít doplnit vyčerpanou kapacitu mimo domov, pokud k tomu dostane příležitost. Frekvence nabíjení bude tím vyšší, čím vyšší bude denně ujetá vzdálenost. To samotné však neříká, zda uživatel pravidelně nabíjí vozidlo doma, nebo zda jej pravidelně nabíjí na veřejné stanici. Ne každý uživatel má vlastní parkovací místo, kde si může na vlastní náklady vybudovat osobní nabíjecí stanici. Uživatelé bytových domů musí využívat veřejných nabíjecích stanic, nebo vybudovat komunitní stanici pro bytový dům či blok domů. V druhém případě je otázka, nakolik bude taková komunitní stanice veřejná, čím bude podmíněno její použití a jak bude zpoplatněno.

Uvedená tvrzení demonstrují vysokou nejistotu v současném stavu problematiky. Ta je prohloubena faktem, že skutečná data požadovaného typu pro ČR neexistují. V modelu je předpokládáno, že situace v ČR bude analogická jako v různých jiných státech, kde elektromobilita je neporovnatelně více rozvinutá a pro které statistiky existují. Ani v těchto státech ovšem není snadné data tohoto typu získat. Data, ze kterých by bylo možné požadované hodnoty koeficientů spolehlivě odvodit, musí být aktuální a musí být sbírána přímo na veřejných nabíjecích stanicích a ideálně navíc i na soukromých nabíjecích stanicích, aby byly k dispozici požadované poměry mezi těmito dvěma typy nabíjecích destinací. Většinou však neexistuje jedna instituce, která by měla možnost sbírat všechna data. Musela by existovat spolupráce mezi různými institucemi, případně by musely existovat smluvené normy na zjišťovaná data, aby z dílčích získaných datových sad bylo možné zkomponovat databázi obsahující ucelený obraz situace. Například provozovatelé veřejných nabíjecích stanic by poskytli data o veřejném nabíjení, prodejci domácích nabíjecích zařízení a poskytovatelé elektrické energie by poskytli vzhled do domácího nabíjení. Vláda, na základě sčítání lidu a majetku, případně specifických dílčích průzkumů, jakým je americký NHTS nebo průzkumů vycházejících ze statistik zjišťovaných při řízení dopravy, by mohla obraz nabíjecího chování následně dokreslit. Při absenci takto kvalitních dat nejen pro ČR, ale často i pro země s rozvinutější elektromobilitou, nezbyvá než se obrátit na dílčí nesouvisející zdroje a pokusit se získat ucelený realistický obraz z nich.

Studie projektu The EV Project [197] pracuje s průzkumem zahrnujícím 3236 respondentů – majitelů elektromobilů, kteří uvádějí jejich vztah k domácímu nabíjení. Studie je zaměřena na poznatky ohledně domácího nabíjení, lze z ní však odvodit, jak často nabíjí uživatelé mimo domov, tedy kdy potenciálně používají veřejné nabíjecí stanice. Zejména na str. 2 a 3 citované studie je uveden histogram a graf, ze kterého lze vyčíst, že občas nabíjí uživatelé vozidla mimo domov. Kvantifikace pojmu „občas“ je všem složitá. Ze studie můžeme s jistotou vyčíst maximálně to, že nabíjení doma převažuje, přičemž veřejné nabíjení tvoří minoritní, ale nezanedbatelnou část celkového počtu nabíjecích událostí. Další studie [198] je zaměřena na předběžný výzkum uživatelského chování z hlediska atributů významně ovlivňujících rozvíjející se

elektromobilitu. Výzkum pojednává o několika evropských zemích, bohužel vztahuje se k roku 2011. Ze zkoumaného hlediska je nejzajímavější zjištění, že přibližně 50 % respondentů napříč zeměmi by nabíjelo své vozidlo na veřejných stanicích buď proto, že musí (nemají vlastní parkovací místo), nebo protože chtějí. Studie je ovšem z doby, kdy elektromobilita ve sledovaných zemích byla na zcela jiné úrovni než dnes.

Jednou z nejpropracovanějších prací na toto téma je nedávná Xuova práce z prostředí Japonska [199]. Zkoumá podrobně japonské nabíjecí chování, přičemž využívá detailní, byť poněkud zastaralá data z jednotlivých elektromobilů zahrnutých pro projektu průzkumu chování uživatelů (detaily k datovému souboru stejně jako dodatečná zjištění lze nalézt v [200]). V tabulce na straně 6 citované práce uvádí autoři základní statistiky vycházející z naměřených dat uživatelského chování. To je rozděleno na cestovní chování (driving behavior) vztahující se k pohybu vozu a k nabíjecímu chování (charging behavior) vztahující se ke způsobu, jakým uživatel vozu nabíjí svůj elektromobil. Z hlediska hledaných hodnot dvou koeficientů  $\varphi$  a  $\eta$  je třeba hledat metriky vztahující se k frekvenci nabíjení a k počtu veřejných nabíjení na celkovém počtu nabíjení. Frekvenci uvádí statistika počtu nabíjení za den, ve který bylo vozidlo aktivní (*Number Per Day Driven*). Počet aktivních dní uvádí statistika *Total Driving Day*. Problém je, že tato hodnota není normovaná, uvedená například za 1 rok. Autoři tvrdí, že počet vozidel zapojených do projektu se za běhu projektu měnil podle toho, jak se postupně vozidla do projektu zapojovala, přičemž projekt začal v únoru roku 2011 a skončil v lednu 2013, ale data pro soukromá vozidla začínají až od října 2011. Z toho důvodu je například střední hodnota 271,80 dní pro soukromá vozidla nevypovídající, jelikož není jasné, jak dlouhý časový úsek tato hodnota pokrývá, tj. zda jde o 271,80 dní z 16 měsíců od října 2011 do ledna 2013, nebo třeba 12 měsíců od ledna 2012 do prosince 2012. Nicméně, autoři uvádí, že většina vozidel se připojila až během roku 2012, tedy 271,80 dní považujeme za část 365 dní (a předpokládejme, že autoři použili stejné časové okno i pro komerční vozidla). Tím dostáváme průměrný počet nabíjení (*Aver Charge Num. Per Day Driven*) pro osobní vozidla vztažený k jednomu kalendářnímu roku jako  $0,52 \cdot \frac{271,80}{365} \cong 0,382$ . Analogicky, pro komerční vozidla tuto hodnotu stanovíme jako  $0,86 \cdot \frac{195,50}{365} \cong 0,461$ . Z hlediska veřejných nabíjecích stanic nás ovšem nezajímá průměrný počet nabíjení pro všechny typy stanic, ale pouze pro veřejné stanice. To je součet statistiky *Aver Fast\_Public Num. Per Day Driven* a *Aver Normal\_Public Num. Per Day Driven*, což v případě soukromých vozidel je  $(0,06 + 0,05) \cdot \frac{271,80}{365} \cong 0,082$  a v případě komerčních vozidel to je  $(0,02 + 0,07) \cdot \frac{195,50}{365} \cong 0,048$ . Jestliže použijeme vážený průměr vycházející z poměrného zastoupení soukromých a komerčních vozidel, pak dostaneme tuto statistiku pro všechna vozidla, tj.  $\frac{34892}{77449} \cdot 0,082 + \frac{42557}{77449} \cdot 0,048 \cong 0,063$ . Jelikož pro veřejné nabíjecí stanice neplatí žádná omezení jejich použití z hlediska vlastnictví vozidla a současně pro ČR vycházíme z celkového počtu registrovaných osobních vozidel, rovněž bez specifikace účelu jejich použití, je tato souhrnná statistika nejbližší hledané veličině.

Nalezená hodnota v sobě už obsahuje jak frekvenci nabíjení  $\varphi$ , tak podíl veřejného nabíjení na celkovém počtu nabíjení  $\eta$ , platí  $0,063 = \eta\varphi$ . Pro další úvahy však bude užitečnější celkový efekt rozdělit a určit hodnoty obou proměnných zvlášť. Denní frekvenci  $\varphi$  určíme z průměrného počtu nabíjení u všech typů nabíjecích stanic jako vážený průměr dle použití vozidla, tj. rov. 19. Podíl veřejného nabíjení  $\eta$  pak dosazením do celkové metriky, tj. rov. 20.

$$\varphi = \frac{34892}{77449} \cdot 0,52 \cdot \frac{271,80}{365} + \frac{42557}{77449} \cdot 0,86 \cdot \frac{195,50}{365} \cong 0,428 \quad \text{Rov. 19}$$

$$\eta = \frac{\eta\varphi}{\varphi} = \frac{0,063}{0,428} \cong 0,147 \quad \text{Rov. 20}$$

Nyní krátce zapolemizujme nad realističností získaných hodnot proměnných  $\varphi$  a  $\eta$  a nad jejich vztahem k situaci v ČR. Hodnota 0,428 parametru  $\varphi$  říká, že uživatelé nabíjí své vozidlo téměř přesně 3x týdně (0,428 nabití za den krát 7 dní je 2,996 nabití týdně). Jde o hodnotu poměrně realistickou, jelikož je to hodnota průměrná, za všechny uživatele a za dlouhý časový úsek. Hodnota je závislá na zvycích uživatelů a průběhu jejich běžného dne. I když jde o případ Japonska před více než 5 lety, dá se s rozumnou mírou nejistoty aplikovat na případ ČR. Její hodnotu v čase bude ovlivňovat zejména technologie kapacity baterií a hustota infrastruktury. Růst kapacity baterií ji může snižovat, rozšiřování nabíjecích příležitostí zvyšovat, přičemž těžko lze sílu těchto efektů vyčíslit. Hodnota se tedy dá bez výraznějších námitek považovat za platnou i pro ČR současnosti. Hodnota  $\eta = 0,147$  pak uvádí, že přibližně jen 14,7 % uživatelů nabíjí pravidelně své vozidlo na veřejných nabíjecích stanicích. Tato hodnota vypovídá o tom, že uživatelé soukromých i komerčních vozidel nabíjí svá vozidla primárně na svých vlastních stanicích. Ze studie nezjistíme, nakolik je tento typ nabíjení pro uživatele předmětem volby nebo nakolik je vynucen neexistencí veřejné nabíjecí infrastruktury. Pokud použijeme poznatky z dalších prací, zejména [197], pak můžeme tvrdit, že hodnota  $\eta = 0,147$  je realistická, i když poněkud nižší, než ukazují průzkumy. Jako střední cestu můžeme volit  $\eta = 0,25$ , jelikož každopádně platí, že veřejné nabíjení by mělo být vůči ostatním typům vždy v menšině, tedy koeficient  $\eta$  by neměl přesáhnout hodnotu 0,5.

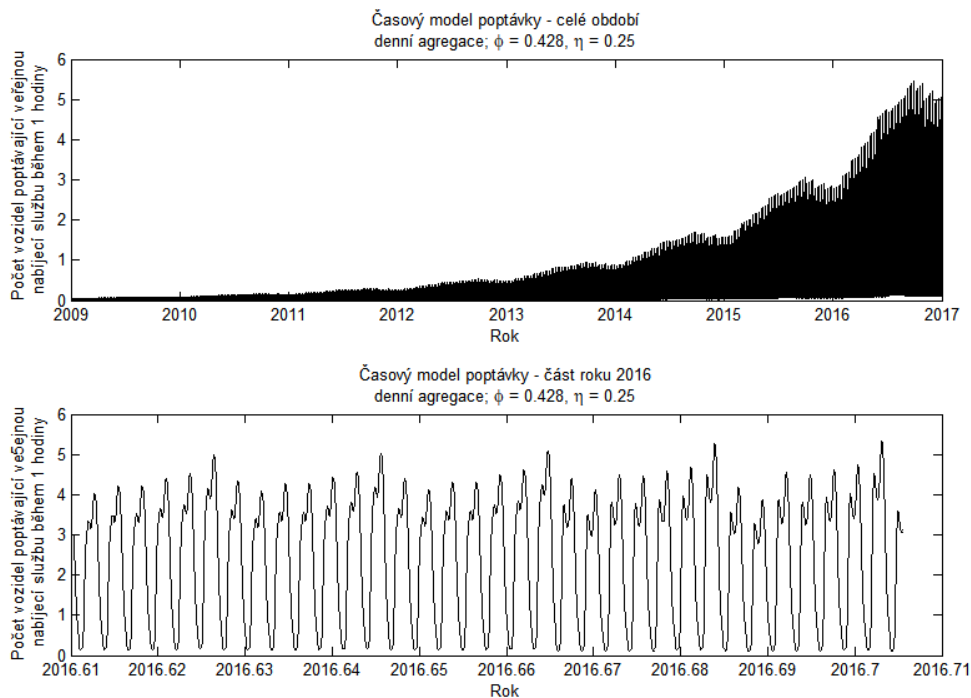
Z hlediska přesnosti koeficientů by bylo pochopitelně mnohem vhodnější pracovat se statistikami z prostřední ČR. Pokud by existoval *reprezentativní* vzorek českých uživatelů elektromobilů, pak bychom se mohli zeptat přímo jich, jak často nabíjejí své vozidlo u veřejných nabíjecích stanic. Problém je, že českých uživatelů PEV je zatím příliš málo a netvoří žádnou organizovanou skupinu, pomocí níž by se dali hromadně kontaktovat. Pokud namítáme, že nikoliv, že přece existují stránky typu Hybrid.cz [37] a podobné zájmové weby a fóra, kde se majitelé PEV sdružují, pak ovšem máme dost závažný problém s reprezentativitou vzorku potenciálních respondentů. Úzká skupina technologických nadšenců pro elektromobilitu asi nebude ideálně reprezentovat vlastnosti široké veřejnosti. Mohou reprezentovat možná tak skupinu *early adopters* a to ještě s výhradou, že ani ti nemusí mít nutně zájem o networking.

## Model kombinující oba typy časového rozložení poptávky

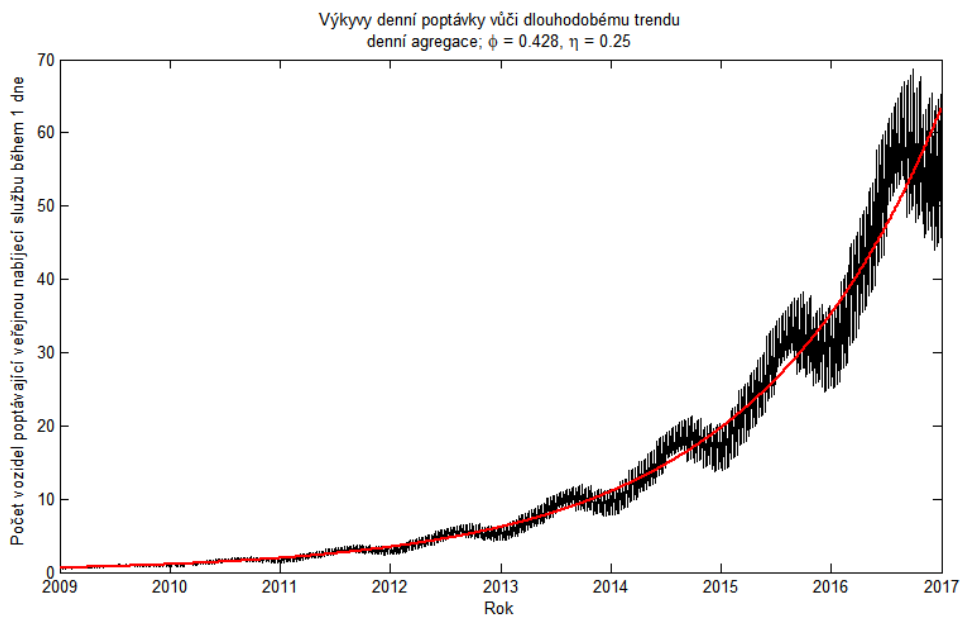
Vybavení dvěma samostatnými modely reprezentujícími časový vývoj poptávky je možné přistoupit k jejich kombinaci. Půjde o obohacení dlouhodobého trendového modelu o periodicitu modelu krátkodobého při zohlednění koeficientu využívání veřejné infrastruktury registrovanými vozidly a koeficientu frekvence nabíjení, což souhrnně zachycuje veličina  $n_t$  z rov. 18. Taková kombinace je poměrně přímočará. Stačí použít exponenciální model dlouhodobého trendu a vypočítat jeho hodnotu pro každou minutu. Následně se použije hodnota  $n_t$  jako denní norma, aby pro den  $i$ , který chápeme jako čas od  $t = 0$  až do  $t = 1$ , platila rov. 21, kde  $n_i$  je počet elektromobilů poptávajících veřejnou nabíjecí službu během dne  $i$  a  $I(t)$  je funkce intenzity dopravy z kapitoly 8.2, resp. funkce roční variability intenzity dopravy popisovaná v této kapitole v sekci o krátkodobém časovém rozložení poptávky.

$$n_i = n_t \int_0^1 I(t) dt \quad \text{Rov. 21}$$

Tím dostaneme finální časový model poptávky, ze kterého lze získat hodnoty poptávky v libovolném čase, které budou platit pro ČR jako celek. Grafické znázornění výstupu takového modelu je kombinací obrázků obr. 19 a obr. 20 a demonstruje jej obr. 21. Získaná časová řada obsahuje řádově miliony hodnot a nelze na ni vidět detaily denní periodicity. Lze pouze vidět růst poptávky v průběhu času, ale nelze vidět detaily denní fluktuace poptávky. Tu zobrazuje přiblížený pohled v dolní části obr. 21. Hodnoty na následujícím obr. 22 jsou přepočtené hodnoty poptávky z hodinové na denní. Znat hodnotu denní poptávky je důležité pro kalibraci modelu a jeho spojení s prostorovým modelem poptávky. Prostorový model poptávky totiž předpokládá, že během 1 dne bude na území ČR poptáván určitý počet nabíjecích transakcí. Tento počet bude v čase růst a periodicky oscilovat podle dne v týdnu a podle období v roce kolem průměrného růstového trendu. A právě toto chování zachycuje obr. 22.



Obr. 21: Časový model poptávky  
(Zdroj: vlastní zpracování, podle timeDemandModelMerge.m)



Obr. 22: Časový model poptávky – denní agregace a výkyvy vůči trendu  
(Zdroj: vlastní zpracování, podle timeDemandModelMerge.m)

## 6.4 Kritika modelu poptávky

Není pochyb, že každý model musí zjednodušovat problém. Nyní je však třeba položit si otázku, zda takto navržený model poptávky nezjednodušuje realitu přespříliš a vzápětí je

nutno s politováním připustit, že pravděpodobně ano. V následujících odstavcích se pokusím předestřít důvody takového tvrzení a ospravedlnit model navzdory výtkám.

Za návrhem diskutovaného modelu stojí předpoklad, že 1) cestovní chování majitelů elektromobilů se neliší od chování běžného řidiče osobního vozu. To znamená, že zjistíme-li chování běžného řidiče, zjistíme též chování majitele elektromobilu. Diskuze nad tímto, stejně jako ostatními spornými předpoklady, bude poskytnuta níže. Druhým předpokladem je, že 2) cestovní chování a nabíjecí chování se neliší. Třetím předpokladem je, že 3) cestovní chování lze plně definovat ze statických dat intenzit dopravy prováděných přibližně jednou za 5 let skupinou lidí s diskutabilní pracovní morálkou a smyslem pro detail. Dalším předpokladem je, že 4) veškeré dodatečné a zpřesňující informace o chování majitelů elektromobilů platí pro Českou republiku stejně jako pro libovolnou jinou zemi na světě.

#### **6.4.1 Chování řidičů PEV a ICEV**

Tento první předpoklad bylo nutné zavést proto, že v době psaní této práce jednoduše neexistuje studie z prostředí ČR (a pokud je autorovi známo, tak ani jiného podobně rozsáhlého regionu světa), která by zjišťovala výhradně chování řidičů elektromobilů (PEV) vůči řidičům běžných vozidel se spalovacím motorem (ICEV). Jinými slovy neexistuje studie, která by potvrzovala či vyvracela hypotézu, že cestovní chování řidičů PEV je totožné s cestovním chováním řidičů ICEV. Ovšem i když by taková studie existovala a tuto svoji hypotézu vyvrátila, pak neexistuje studie, která by odpověděla na otázku, jaké je tedy cestovní chování řidičů PEV (pokud bychom již věděli, že se liší od chování řidičů ICEV). Právě praktická nemožnost říct, jak se v agregovaném pohledu chovají výhradně řidiči PEV, je důvodem tento problém zcela zanedbat a stanovit předpoklad, že chování řidičů PEV je totožné s chováním řidičů ICEV. Tudíž pro modelování chování řidičů PEV může být použito dat o chování řidičů ICEV, která k dispozici jsou. Na tento první zjednodušující předpoklad je dekomponovatelný ještě dále a vede na problém rozdílu mezi cestovním a nabíjecím chováním.

#### **6.4.2 Cestovní a nabíjecí chování**

Rozdíly v chování řidičů PEV a ICEV mají hluboké kořeny a souvisí s fundamentálním rozdílem v paradigmatu používání osobního vozidla. Pročítáme-li zkušenosti současných majitelů PEV [37] [42] [44], kteří reflektují jejich současný způsob používání osobního vozidla vůči předchozímu stavu, kdy využívali ICEV, pak zjišťujeme, že u mnoha uživatelů nejde o pouhou výměnu jednoho vozu za jiný, ale o změnu celkového přístupu k používání osobního vozu. Zatímco ICEV jsou běžně používány víceméně neomezeně z hlediska dojezdové vzdálenosti, tj. cesta z místa A do B je pouhým přesunem, tak používání PEV zejména na dlouhé tratě je z principu omezeno přestávkami na nabíjení. Tyto přestávky však nejsou uživateli vnímány jako něco nutně negativního, ale často jako vítaným zpestřením cesty. Po určitém čase jízdy a určité ujeté vzdálenosti, u dražších modelů může jít třeba o 300 km, je přestávka vhodná na odpočinek a občerstvení. U

rychlonabíjecích stanic navíc platí, že taková přestávka nemusí být nijak závratně dlouhá, často v řádech desítek minut.

U kratších tratí, které mohou být absolvovány bez přestávky na nabíjení, je pak otázka používání vozidla postavena ještě jinak. Zatímco se uživatel ICEV cestující z bodu A do B rozhoduje o místě zanechání vozidla čistě z hlediska volného parkovacího místa, jeho ceny a blízkosti k místu B, tak uživatel PEV řeší, která lokalita u místa B disponuje volným místem k nabíjení. Opět se zdá, že by mělo jít o další překážku, kterou jsou uživatelé PEV omezováni. Ze zkušeností uživatelů PEV to však tak úplně nevyplývá. Mnoho uživatelů integruje existenci nebo neexistenci nabíjecí stanice do svých cestovních plánů, a tak při rozhodování o tom, kam se vydají na nákup či za zábavou, se rozhodují také podle toho, zda v dané lokalitě je či není nabíjecí stanice. Tato skutečnost ovšem představuje problém pro modelování jejich chování. Jestliže je chování uživatelů PEV ovlivněno existencí nabíjecí infrastruktury, a to ne zcela jasným způsobem, pak pouze víme, že poptávka a nabídka se vzájemně ovlivňují na mnohem hlubší úrovni, než předpokládá model tržní interakce v kapitole 8. Takové zjištění ovšem vede na zásadní přehodnocení struktury navrhovaného modelu, ze kterého by minimálně plynula nutnost určit, jak a jakou měrou je poptávka ovlivněna nabídkou a vice versa. A zde by opět nastal problém praktické proveditelnosti takové analýzy. Jednoduše neexistují dostupné studie, které by kvantifikovaly dopad existence nabíjecích stanic na rozhodování uživatelů PEV. Podobně jako v předchozím případě z důvodu praktické nedostupnosti informací, na základě kterých by mohl být model zpřesněn, nezbyvá než tento problém zcela ignorovat a zavést předpoklad, že cestovní chování PEV není ovlivněno nutností nabíjet. To znamená, že z důvodu praktické nedostupnosti informací jsme nuceni předpokládat, že uživatelé PEV používají své vozidlo stejným způsobem, jako kdyby používali ICEV, i když z jejich výpovědí by se dal odvodit opak.

### 6.4.3 Data intenzity dopravy

Třetí předpoklad hovoří o tom, že existující data o intenzitě dopravy poskytují dostatečně vypovídající obraz o cestovním chování řidičů. Pomineme-li předchozí problematiku toho, že dostupná data hovoří pouze chování obecně (nerozlišuje se ICEV a PEV) a my potřebujeme zjistit chování uživatelů pouze PEV, pak zbývá identifikovat problém kolem povahy sběru těchto dat. Sčítání dopravy, ze kterého je čerpáno se provádí v krátkém časovém úseku několika dní plošně na vybraných úsecích silnic ČR. V minulosti bylo zvykem, že sčítání prováděla početná a levná pracovní síla, často studenti středních škol, přičemž v procesu sčítání nebylo příliš zajištěno zpětné kontrolování kvality jejich výstupu, tj. nebylo kontrolováno, nakolik zjištěné počty odpovídají realitě. Jistou dávkou statistické kontroly lze očekávat, nicméně dá se předpokládat, že chyba v datech oproti realitě se může pohybovat v řádu jednotek procent. Tolik k první části, přesnosti obsahu dat. Na problematiku takto získaných statických dat lze však nahlédnout i jiným způsobem. Například se lze ptát, zda lze datový soubor aktualizovaný jednou za 5 let použít pro náš časový model poptávky. Aproximace cestovní dynamiky v meziobdobí je vskutku velmi hrubá. Opět však narážíme na praktickou nemožnost zpřesnění, jelikož



jediné dostupné údaje o dopravě v takovém rozsahu se zkrátka aktualizují pouze jednou za 5 let.

#### 6.4.4 Řidiči v Česku a v zahraničí

Nyní se podívejme na předpoklad poslední, totiž že chování řidičů v ČR je stejné jako chování řidičů jinde na světě. Tento předpoklad se může zprvu jevit poměrně realisticky, ostatně je běžnou praxí vztahovat závěry zahraničních článků pojednávající o jevech vyskytujících se v zahraničí na vlastní zemi nebo region. Nicméně při bližším pohledu je zřejmé, že je potřeba minimálně připustit, že se chování majitelů elektromobilů, či dokonce osobních vozidel obecně může lišit v závislosti na zemi. Provedme nyní krátký mentální experiment, na němž toto demonstrujeme a uvažujeme 4 velmi odlišné země. První bude rozlohou velká, relativně bohatá země, řekněme USA, druhou bude velká, relativně chudá země, řekněme Čína, třetí bude rozlohou malá, relativně bohatá a reliéfem rovinatá země, například Nizozemsko a čtvrtou bude malá, relativně chudá země s vlnitým terénem, což bude případ Česka. Nyní si ukážeme, že pro každou z těchto zemí existují pádné důvody se domnívat, že využívání osobní automobilové přepravy bude v každé z nich mít zásadně odlišný profil, a tudíž nebude možné zaměňovat řidiče z jedné země za řidiče z jiné.

Řidiči v rozlehlých zemích jako je USA nebo Čína zřejmě nebudou používat ve velkém měřítku osobní přepravu na cestování z napříč celou zemí. K tomu jim bude sloužit letecká doprava v zemích bohatších (USA) a vlaková, případně autobusová doprava v zemích chudších (Čína). Naproti tomu právě potřeba cestování napříč celou zemí, tedy řádově stovky kilometrů, může být pro rezidenta malé země hlavní argument ohledně omezené dojezdové vzdálenosti elektromobilů a jejich pomalého nabíjení. Rozdíl mezi malou bohatou a malou chudou zemí bude v tom, že dostupnost dražších modelů elektromobilů s vysokou dojezdovou vzdáleností si může dovolit v malé chudé zemi podstatně méně obyvatel než v malé bohaté zemi, což ještě prohloubí frustraci z nedostatečné dojezdové vzdálenosti. Dalším aspektem rozdílného bohatství bude, že obyvatelé chudých zemí budou považovat PEV, stále relativně drahé vůči ICEV, za zbytečný luxus. Dále, pokud se podíváme na rozdílnost dvou podobně velkých zemí, avšak s odlišným reliéfem, řekněme zvlněná až kopcovitá ČR vůči naprosto rovinatému Nizozemsku, pak zjistíme, že na krátké až středně dlouhé vzdálenosti, například pohyb po městě a předměstích, jsou lidé v případě Nizozemska běžně zvyklí a ochotní používat ve velké míře jízdní kola, kdežto v případě ČR nikoliv, případně jedná se o zvyk úzké skupiny obyvatel.

Pokud je tedy v určitých částech poptávkového modelu nahrazován nedostatek informací z prostředí ČR informacemi ze zahraničí, pak je nutné vždy pamatovat na omezenou platnost tohoto zavedeného předpokladu. Podobně jako v předchozích případech, i zde ovšem chybí faktický důkaz, že tomu tak skutečně je.

#### 6.4.5 Shrnutí kritiky

Kritika zavedených předpokladů se celá točí okolo faktu, že z důvodu nedostatku informací bylo nutno zavést zjednodušující předpoklady, které při bližším pohledu příliš neodpovídají realitě. Nejedná se však o předpoklady záměrně nerealistické, naopak. Zavedené předpoklady byly formulovány tak, aby pro ně existovala opora ve faktických datech, ovšem aby byly zároveň oproštěny od všech nepodložených spekulací. Model navíc zůstává otevřen úpravám a jakmile se objeví nové informace blíže specifikující povahu poptávky, tedy chování českých uživatelů PEV, mohou být zjednodušující předpoklady odstraněny a model zpřesněn.

Není cílem poskytnuté kritiky snižovat význam navrženého modelu nebo jeho vědeckost. Kritika se naopak snaží identifikovat známá slabá místa modelu a reagovat na ně. Autor se domnívá, že objektivnější reflexe vlastní práce je pro kvalitu modelu naopak přínosná. Jestliže víme, kde a jak je model záměrně zjednodušen pro současný nedostatek informací, pak můžeme v budoucím výzkumu na těchto poznatcích stavět a model zpřesnit, jakmile budou k dispozici kvalitnější data.

## 7 Model nabídky nabíjecí služby

Model nabídky reprezentuje druhou stranu tržní interakce. Zatímco se model poptávky zaměřuje na uživatele elektromobilu poptávajícího nabíjecí službu, určuje rozsah jeho požadavků a jejich rozmístění v čase a prostoru, model nabídky se zaměřuje na poskytovatele nabíjecí služby. Nabídka nabíjecí služby je chápána jako veřejně dostupná, což bude vysvětleno podrobněji níže, a reálně je konstituována sítí nabíjecích stanic, někdy souhrnně označovanou jako nabíjecí infrastruktura. Model nabídky nabíjecí služby je tedy modelem nabíjecí infrastruktury určeným pro potřeby disertační práce.

Shrňme-li to, pak nabídkou nabíjecí služby se má na mysli služba poskytovaná veřejně dostupnými nabíjecími stanicemi na území ČR pro příjíždějící osobní elektromobily.

### 7.1 Výchozí zdroje literatury a dat

Původní myšlenka návrhu samostatného modelu nabídky vznikla už v konceptuální formulaci optimalizačního problému v [105]. Tehdy ještě nespecifikovaná veličina nabídky interagovala s poptávkou a poskytovala představu o oblastech, kde poptávka a nabídka nejsou v rovnováze, tedy kde je potřeba nějakého druhu optimalizačního zásahu. Konkrétnější obrysy získal model nabídky až později [201], na tomto základě byly rozpracovány klíčové faktory ovlivňující nabídku nabíjecí služby. V citovaném článku dostal model nabídky konkrétnějších obrysů také proto, že již byla použita otevřená a pravidelně aktualizovaná databáze nabíjecích stanic na území ČR [177]. Díky ní je možné sledovat aktuální podobu nabíjecí infrastruktury ve světě, mimo jiné rovněž v ČR, a přes uživatelsky přívětivé API poměrně snadno importovat data do vlastních aplikací. Prezentace základních úvah o modelu nabídky i databáze nabíjecích stanic budou předmětem následujících kapitol.

### 7.2 Open Charge Map databáze

Jedná se o nekomerční a neziskovou službu udržovanou a podporovanou komunitou firem, vývojářů a institucí [177]. Její hlavní výhodou je zejména přehledné API umožňující zadat dotaz pouze na stanice v ČR. Jelikož se jedná o otevřenou platformu, není důvod se domnívat, že je kompletní, aktuální, že data neobsahují chyby apod. Srovnat tuto službu lze třeba se službou poskytovanou Asociací elektromobilového průmyslu [202], aplikací EVmapa [203], mapu poskytovanou serverem Hybrid.cz [204], nebo službu provozovanou skupinou ČEZ pro vlastní nabíjecí stanice [75]. Po zběžné analýze je zřejmé, že pokud se nejedná o řešení záměrně zobrazující produkty pouze jediného poskytovatele (například případ aplikace od skupiny ČEZ), pak jsou jednotlivé databáze nabíjecích stanic z hlediska množství stanic, dostupných informací o stanicích a aktuálnosti dat kvalitativně rovnocenné. Kritérium výběru se pak přesouvá do další roviny, například implementační, kde jasně vede služba Open Charge Map se svým přímočarým API. Postačí jakýkoliv software s funkcí čtení XML souborů a pomocí dotazu ve formátu:

<http://api.openchargemap.io/v2/poi/?output=xml&countrycode=CZ&maxresults=10000>

lze stáhnout kompletní aktuální seznam nabíjecích stanic pro ČR v .xml formátu. API umožňuje specifikovat dotaz mnohem přesněji, čímž by došlo k jemnějšímu filtrování dat, ale uvedeným způsobem lze stáhnout kompletní dostupnou databázi relevantní pro ČR, což je při průzkumu databáze nejvhodnější.

Získaný XML soubor obsahuje o každé nabíjecí stanici množství statistik. Z nich jsou vybrány ty nejdůležitější, jejichž stručný popis obsahuje tab. 5.

Tab. 5: Parametry nabíjecí stanice

Název	Popis	Příklad
Umístění	Stručný popis lokality, kde se stanice nachází.	Galerie Vaňkovka
Zeměpisná šířka	Zeměpisná souřadnice ve formátu WGS-84.	49.1881169033673
Zeměpisná délka	Zeměpisná souřadnice ve formátu WGS-84.	16.6147003490002
Počet konektorů	Počet konektorů s různými parametry proudu a napětí. Každý typ konektoru má vlastní parametry proudu, napětí, kategorie, množství a stavu.	3
Elektrický proud (A)	Deklarovaná hodnota elektrického proudu v ampérech. Každý konektor má tuto statistiku vlastní.	32
Elektrické napětí (V)	Deklarovaná hodnota elektrického napětí ve voltech. Neobsahuje informaci o polaritě. Každý konektor má tuto statistiku vlastní.	400
Kategorie (tzv. Level)	Rozdělení výkonu konektoru do tří úrovní podle přibližných výkonnostních úrovní. Každý konektor má tuto statistiku vlastní.	Level 2: Medium (Over 2kW)
Množství	Násobnost konektoru určitého typu. Množství větší než 1 znamená, že konektor s daným proudem, napětím, kategorií a stavem je v rámci nabíjecí stanice zastoupen více než jednou.	2
Stav	Deklarovaný stav stanice při poslední aktualizaci.	Operational
Poslední aktualizace	Časové razítko poslední aktualizace.	12/6/2016 6:39:00
Operátor	Název provozovatele nabíjecí stanice.	E.ON (cz)
Dostupnost	Úroveň dostupnosti služby. Určuje, kdo a za jakých podmínek může využívat nabíjecí službu.	Public

(Zdroj: vlastní zpracování dle CSdownload.m, CStransformData.m a CSmodel.m)

### 7.3 Faktory

Modelovaná veličina nabídky nabíjecí služby je postavena na několika faktorech (dimenzích problému). Ty je pro přehlednost výkladu vhodné nejdříve samostatně vymezit a následně přejít k popisu jejich vzájemné interakce.

### 7.3.1 Prostorová dimenze

Nabídka podobně jako poptávka musí být vázána na konkrétní pozici v reálném světě. Tím je myšleno umístění nabíjecí stanice v rámci ČR. Poloha každé nabíjecí stanice je dána dvojicí zeměpisných souřadnic, viz tab. 5. Jak ale určit, zda určitá množina nabíjecích stanic má správnou polohu?

Intuitivní představa, že všechny stanice nabíjecí infrastruktury by zřejmě neměly stát v jednom místě, ale měly by být rovnoměrně rozprostřeny po území ČR, je jasná. Ovšem detaily za touto prvotní představou už tak jasné nejsou. Nabízí se hned několik otázek: Jak daleko od sebe mají stanice stát, jaká je optimální vzdálenost? Jak se bude jejich vzájemná vzdálenost měřit? Bude vzdálenost stejná na celém území ČR? Odpověď na tyto otázky je třeba hledat v modelu poptávky. Intuitivně je odpověď opět jasná. Stanice by měly stát tam, kde je uživatelé PEV potřebují a nestát tam, kde je uživatelé nepotřebují. Tímto kritériem se blížíme představě optimálního prostorového rozmístění, ale opět vyvstává množství otázek. Například pokud budu tvrdit, že optimální poloha určité stanice je v bodě X, ale skutečná stanice leží v bodě Y, který je od bodu X vzdálen 50 metrů, budu pak tvrdit, že poloha stanice je neoptimální? A pokud ano, jak se vypořádám s faktem, že vzdálenost bodu X a Y je pouze 50 metrů a ne třeba 50 kilometrů?

Z modelu poptávky plyne, konkrétněji z jeho prostorové části, že uživatelé poptávají nabíjecí službu souvisle po celém území ČR, přičemž v různých bodech má tato poptávka různou hodnotu. Z technických důvodů je tato hodnota poptávky určena diskrétně, území ČR je pokryto mřížkou předem dané hustoty a hodnoty poptávky jsou definovány pro buňky této mřížky, čímž dochází ke zjednodušení, které považuje všechny body jedné buňky za rovnocenné. V uvedeném příkladu dvou bodů vzájemně vzdálených 50 metrů by tedy záleželo, zda body X a Y leží ve stejné nebo jiné buňce. Pokud by ležely ve stejné buňce, byl by bod Y považován za shodný s bodem X, tudíž poloha stanice by byla označena za optimální. Pokud by ležely v různých buňkách, je třeba určit, nakolik je tento stav neoptimální.

Zde použijeme znalosti získané při tvorbě modelu poptávky, zejména pak analýzu service area. Již v kapitole 4.4.3, později pak v kapitole 6 je zmiňována omezená dojezdová vzdálenost elektromobilů jako nejzazší podmínka pohybu vozidel. Ta je vyjádřena jako maximální poloměr service area definovaná jako  $d_{max}$  v případě původní grafové reprezentace service area, lépe pak jako  $r_{max}$  v případě reprezentace service area pomocí modelu typu mesh. Tato vzdálenost je hranice, za kterou je pro uživatele nabíjecí služba příliš vzdálená, než aby byl schopen stanici navštívit (nestačí mu kapacita baterie). Přeneseně se jedná o vzdálenost, za kterou je ochota uživatele navštívit stanici nulová, tj. minimální. Naopak pokud leží stanice přesně v místě, kde uživatel službu poptává, je jeho ochota navštívit tuto stanici maximální. Tuto prostou úvahu použijeme k formulaci metriky prostorové vhodnosti umístění stanice a označme ji  $\sigma$ . Tato metrika vychází z vymezení bodů service area typu mesh v rov. 13 a používá funkci ochoty cestovat za nabíjecí službou  $\omega$ . Metriku  $\sigma$  pro service area  $i$  popisuje rov. 22. V ní figuruje funkce  $\omega$  jako váha vzdálenosti mezi dvojicí bodů  $y$  a  $c$  normovaná na vzdálenost  $r_{max}$ . Body  $y$

jsou všechny body patřící do service area  $i$ , jejichž praktický počet je omezen hustotou mřížky meshe, tj. jedna buňka mřížky je reprezentována jednou hodnotou  $y$ . Bod  $c_i$  je střed service area  $i$ . Proměnná  $D_y$  je okamžiková hodnota poptávky v bodě  $y$ , tedy v každé buňce mřížky spadající do service area  $i$ , a její hodnota vychází z prostorového modelu poptávky. Povšimněme si, že definice hodnoty poptávky  $D_y$  se odkazuje pouze na prostorový poptávkový model. Metrika  $\sigma$  záměrně zachycuje pouze prostorové rozložení poptávky a poskytuje odpovědi ohledně vhodnosti prostorového rozložení nabíjecích stanic. Časová variabilita poptávky zde nemusí být vůbec uvažována, jelikož v modelu poptávky je tato variabilita aplikována v celém sledovaném prostoru rovnoměrně, tudíž nemění prostorové rozdíly v poptávce. Proto je metrika  $\sigma$  na čase nezávislá a lze ji stanovit pro libovolný časový okamžik.

Funkce  $\omega$  může mít různou podobu. Nejjednodušší je předpokládat lineární pokles ochoty cestovat s rostoucí vzdáleností, který znázorňuje rov. 23. Je nicméně třeba připustit, že skutečný vztah není známý. Je možné pouze spekulovat, tedy navrhopat různé alternativní funkce  $\omega$ . Takovou může být například funkce sigmoidálního tvaru z rov. 24, která ovšem není sigmoidou v pravém smyslu. Její definiční obor není  $\mathbb{R}$ , jak bývá zvykem u klasických sigmoidálních funkcí, ale  $\langle 0, r_{max} \rangle$  a v krajních bodech definičního oboru nabývá hodnot 0, resp. 1. Tato funkce modeluje případný nelineární vztah. U všech verzí funkce  $\omega$  je  $r_{max}$  maximální poloměr kruhové service area a  $d_m$  je geodetická vzdálenost mezi dvěma body používaná v kap. 6 k měření vzdálenosti v modelu meshe.

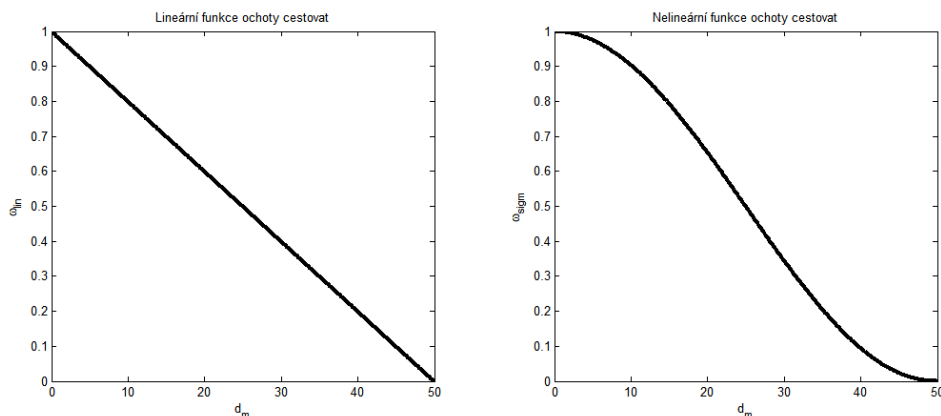
$$\sigma_i = \sum_{\forall y \in SA_i} \omega(y, c_i, r_{max}) D_y \quad \text{Rov. 22}$$

$$\omega_{lin}(y, c, r_{max}) = \frac{r_{max} - d_m(y, c)}{r_{max}} \quad \text{Rov. 23}$$

$$\omega_{sigm}(y, c, r_{max}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\pi \frac{d_m(y, c)}{r_{max}}\right) \quad \text{Rov. 24}$$

$$0 \leq \omega \leq 1; \quad (0 \leq d_m \leq r_{max}) \sim \text{Rov. 13} \quad \text{Rov. 25}$$

Grafy obou navržených funkcí  $\omega$  jsou pro ilustraci znázorněny na Obr. 23.



Obr. 23: Možné podoby funkce  $\omega$   
 (Zdroj: vlastní zpracování, pomocí CSomegaFunction.m)

Nehledě na typ použité funkce  $\omega$  musí platit, že vyšší hodnota metriky  $\sigma$  značí lepší pokrytí poptávky nabíjecí stanicí. Odtud už nyní můžeme odvodit, že metrika  $\sigma$  bude v optimalizačním problému figurovat jako veličina, kterou bude cílem maximalizovat.

Ještě uvedme, že lokalita stanice není vymezena nijak detailněji než dvojicí zeměpisných souřadnic. V modelu není zohledněno, zda jde o stanici volně stojící přímo podél silniční komunikace, stanici v rámci nákupního centra, stanici v patrových garážích apod. Rovněž není specifikováno, zda jde o stanici v rámci obce, tedy dostupnou z místní komunikace, nebo stanici stojící mimo obec dostupnou z dálnice či silnice, přičemž při tomto dělení se vychází z terminologie Zákona o pozemních komunikacích [175]. Model rovněž nepracuje s cenou pozemku konkrétní lokality nabíjecí stanice, a to zejména proto, že ji lze jen velmi obtížně přesně určit. Lze sice konkrétní cenu parcely odhadnout, odhady však jsou značně hrubé. Cena parcely je navíc minoritní v celkových nákladech na pořízení a provoz nabíjecí stanice. Detailnější polemiku nad jednotlivými složkami nákladů lze nalézt v kapitole 12.

### 7.3.2 Časová dimenze (expanzivní + obslužný pohled)

Vedle prostorové dimenze stojí dimenze časová jakožto klíčový faktor ovlivňující nabídku veřejné nabíjecí služby. Význam času je z pohledu nabídky podobně významný jako byl v případě modelu poptávky (viz kapitola 6.3.2). Nyní se však musíme zaměřit na nabíjecí stanice, konkrétně si představit, jak zřejmě bude probíhat jejich provoz z pohledu časového rozložení během dne či roku.

Předně, rozlišme dvě časové úrovně, tj. dlouhodobou a krátkodobou, podobně jak tomu bylo v případě poptávky v kapitole 6.3.2. Z pohledu dlouhodobé úrovně se ptáme, zda dochází ke změně úrovně nabídky v čase, tzn. zda se celkový dostupný časový fond nabíjení v čase mění. Z krátkodobého pohledu se pak ptáme, jak vypadá okamžitá situace na nabíjecí stanici, tedy jaké možnosti poskytnutí nabíjecí služby má určitá stanice v každém okamžiku. Jak ukážeme dále, pro takové rozlišení nabídky nejsou pojmy

dlouhodobý a krátkodobý příliš vhodné. Označme proto první pohled na časové hledisko nabídky jako *expanzivní* a druhý pohled jako *obslužný*.

### **Expanzivní časová dimenze**

Termínem expanzivní je zdůrazněno jedno hledisko zkoumající jak a zda dochází ke změně celkového časového fondu nabídky nabíjecí služby (TTSF – *total time supply fund*). TTSF je pomocný koncept, který nám umožní zkoumat rozdíly mezi expanzivní a obslužnou časovou dimenzí. TTSF je chápán jako potenciál nabíjecí infrastruktury (sítě nabíjecích stanic na určitém území) poskytnout nabíjecí službu poptávajícím vozidlům za určité časové okno, řekněme 24 hodin. Zkráceně jde o schopnost nabíjecí infrastruktury (nabídky) uspokojovat poptávku. TTSF bude zřejmě závislý na aktuálním počtu nabíjecích stanic, jejich výkonu, případně schopnosti přijíždějících vozidel tento výkon přijímat, dále pak na kompatibilitě konektorů vozidel a stanic a na aktuální obsazenosti stanic.

TTSF roste, pokud se do infrastruktury přidávají nové stanice. Rovněž roste, pokud se zvyšuje nabíjecí výkon určité stanice. Obojí uvažujeme *ceteris paribus*. Tyto dva efekty ukazují, jak je TTSF v čase ovlivněna změnou rozsahu nabíjecí infrastruktury ve smyslu změny počtu nebo výkonu nabíjecích stanic. Jestliže hovoříme o stavu budování nabíjecí infrastruktury na území ČR, pak lze zřejmě očekávat, že TTSF bude v čase růst podle toho, jak nabíjecí infrastruktura bude expandovat. Expanzivní složka TTSF je tedy způsobena změnou (expanzí) nabíjecí infrastruktury jako takové a v jistém smyslu ji lze chápat jako makro pohled na časovou dimenzi.

Expanzivní složka TTSF však nevysvětluje, jak a zda se může TTSF měnit z důvodu změny nabíjecího chování, podle toho, jak jednotliví uživatelé vytěží v každém časovém okamžiku jednotlivé nabíjecí stanice.

### **Obslužná časová dimenze**

Situaci na mikro úrovni naopak sleduje obslužná složka TTSF. Aktuální situaci na jednotlivých nabíjecích stanicích nelze v žádném případě předpovídat. Důvodem je prostý fakt, že aktuální zákaznická poptávka po nabíjecí službě, tedy vytíženost nabíjecích stanic je čistě závislá na individuálním rozhodnutí každého jednoho majitele elektromobilu. Mikro úroveň tedy nelze sledovat přímo, jde ji však realisticky simulovat. Tím je myšleno, že je možné využít obecné vzory v chování zákazníků, které se ve skutečnosti projevují specifickými časovými a kapacitními požadavky na nabíjecí službu, a pomocí těchto vzorů navrhnout simulátor požadavků zákazníků, který sice bude na mikro úrovni zcela odlišný od reality, ale na makro úrovni bude vykazovat stejné obecné vzory chování se stejnými důsledky na využití nabíjecí infrastruktury jako je tomu ve skutečnosti.

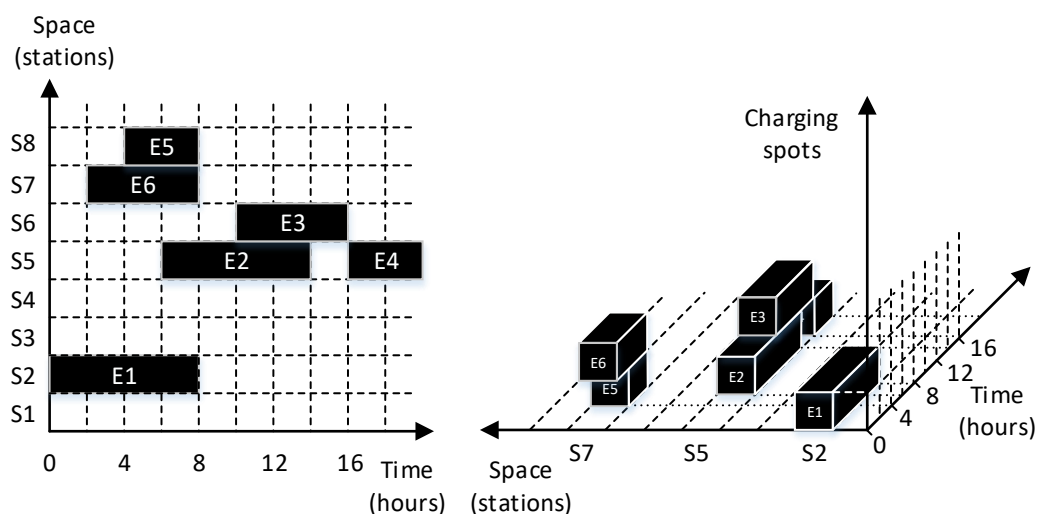
Obslužná složka TTSF zachycuje, jak se promění situace na mikro úrovni, jestliže se změní některý z obecných vzorů chování a jak se tato proměna mikro úrovně projeví na celkové TTSF. Nejdříve uveďme grafickou reprezentaci výchozího stavu z obr. 24



převzatého ze článku [201]. Lze vidět graf demonstrující možnou situaci na jednotlivých nabíjecích stanicích značených jako S1, S2, ... během dne. První obrázek vlevo ukazuje situaci v případě, kdy zjednodušeně uvažujeme, že každá stanice má pouze jedno nabíjecí místo. Druhý graf vpravo pak přidává další dimenzi a uvažuje libovolně definovatelný počet paralelních nabíjecích míst na každé stanici. Grafická reprezentace umožňuje lépe domýšlet individuální důsledky uvažovaných obecných změn.

Nabíjecí událostí E1, E2, ... znázorňují vytiženost každé stanice, resp. každého jejího nabíjecího místa v čase jednotlivými nabíjecími požadavky. Začátek každé nabíjecí události vzniká přijetím vozidla k nabíjecí stanici, což je individuálně nepředvídatelná událost, která může nastat kdykoliv. Konec nabíjecí události vzniká opuštěním nabíjecího místa vozidlem. Opět jde o individuálně nepředvídatelnou událost, i když by se mohlo zdát, že konec nabíjecí události lze přímo odvodit z jejího začátku a času potřebného k plnému nabití vozidla. Při bližším pohledu tomu tak však není. Každý majitel vozidla může mít jiný záměr. Plné nabití vozidla není nutně pravidlem, mezi uživateli elektromobilů je běžným chováním nečekat na plné nabití, ale nabít na veřejné stanici pouze tolik, aby byl dotyčný schopen dokončit svůj denní cestovní plán. Tím se skutečný nabíjecí čas proti původnímu zjednodušenému očekávání zkracuje. Naopak, vozidlo může zůstat oproti očekávání déle, pokud majitele nic nemotivuje k opuštění nabíjecího místa a využívá ho rovněž jako místo parkovací. V takovém případě není nabíjecí událost ukončena v momentě dobití plné kapacity vozidla, ale až tehdy, kdy s vozidlem majitel odjede. V poslední řadě uvedme, že ani samotná požadovaná kapacita nabíjení není individuálně předvídatelná, jelikož každý uživatel může mít potřebu dobití svého vozidla na jiné úrovni jeho zbývající kapacity.

Začátek a konec konkrétní nabíjecí události jsou zde na mikro úrovni individuálně nepředvídatelné. Existují ovšem obecné faktory, které mají na jednotlivé nabíjecí události vliv a které způsobí, že v makro pohledu se tyto faktory promítnou do změny obslužné složky TTSTF.



Obr. 24: Příklad rozdělení nabíjecích událostí během dne; 1 stanice může obsluhovat pouze 1 vozidlo (vlevo); 1 stanice může obsluhovat více vozidel (vpravo)

(Zdroj: [201])

Lze očekávat, že hodnota TTSF bude růst, jestliže určitý počet nabíjecích událostí bude rozprostřen během dne rovnoměrně. Naopak TTSF bude obecně klesat, jestliže bude poptávka po nabíjení během dne nerovnoměrná, tzn. v určité hodiny bude poptávka po nabíjení vyšší než v jiné hodiny (rozdíl mezi dnem a nocí). To se dá odůvodnit tím, že konstantní počet nabíjecích míst bude sice z agregovaného pohledu celého dne kapacitně dostačovat poptávce, ale její okamžitá hodnota bude převyšovat okamžitou hodnotu nabídky – okamžitou kapacitu nabíjecích stanic. To způsobí, že některé požadavky na nabíjení budou muset být odmítnuty, popř. budou postaveny do fronty. Oboje bude zhoršovat v našem intuitivním konceptu hodnotu TTSF, jelikož ta zde naráží na úzké místo způsobené omezenou schopností infrastruktury poskytovat nabíjecí službu.

Obdobně, TTSF bude klesat, jestliže budou majitelé svá vozidla nechávat připojena i po plném nabití. TTSF bude naopak růst, jestliže majitelé budou využívat pouze efektivnější část nabíjecí události (nabíjení baterie má nelineární charakter, za 50 % času se nabije zhruba 80 % kapacity, zbylých 20 % se nabije za zbývajících 50 % času) a budou odjíždět ještě před plným nabitím svého vozidla. Jako referenční stav zde implicitně předpokládáme, že majitelé ukončí svou nabíjecí událost v momentě, kdy dobijí své vozidlo do 100 %. Nutno poznamenat, že takové jednání není ani reálné, ani nutně racionální.

Dá se očekávat, že ochota zákazníků čekat ve frontě delší dobu bude zvyšovat hodnotu TTSF, naopak ochota zůstat ve frontě pouze kratší dobu, nebo neochota čekání vůbec, bude TTSF snižovat. To lze vysvětlit prostým konstatováním, že čekání ve frontě umožní okamžitý vznik nové nabíjecí události při ukončení nabíjecí události předchozí, tedy poptávka bude nakonec uspokojena, TTSF poroste. Tento stav lze reflektovat oproti tomu, kdy zákazníci ve frontě ochotni čekat nejsou, tzn. pokud přijedou ke stanici a ta není volná, pak okamžitě odjíždějí, čímž jejich poptávka uspokojena není, resp. ta sama svým způsobem zaniká, TTSF klesá. Otázkou je, jak by se odmítnutý zákazník choval, resp. jak by se zachovali odmítnutí zákazníci v makro pohledu. Odpověď na toto by ovšem byla předmětem ryzích spekulací.

Z obr. 24 můžeme rozpoznat ještě další příklad chování, které bude mít vliv na TTSF. V tomto ilustrativním příkladu jsou od sebe nabíjecí události E2 a E4 vzdáleny 2 hodiny. Tím je myšleno, že konec nabíjecí události E2 nastane 2 hodiny před začátkem následující události E4. Můžeme se zamyslet, zda lze tuto volnou kapacitu 2 hodin bez problému přičíst k hodnotě TTSF a zda je tato volná kapacita kvalitativně stejná jako jakákoliv jiná volná kapacita v grafu. Pokud uvážíme, kdy by tato volná kapacita mohla být využita k tvorbě potenciální nabíjecí události bez negativního ovlivnění TTSF zásahem do událostí E2 a E4, pak zjistíme, že je vázána právě existencí těchto událostí E2 a E4, resp. jejich začátkem a koncem. Diskutovaná volná kapacita může být využita pouze tehdy, promění-li se v nabíjecí událost začínající nejdříve s koncem E2 a končící nejpozději se začátkem E4. Pokud zároveň uvážíme, že nabíjecí událost do 2 hodin je málo pravděpodobná (v grafu ani nefiguruje), pak je toto „volné okno“ kvalitativně horší než

například volná kapacita za událostí E4. Zde ale narážíme na to, že hodnocení partikulárních částí nabídky lze odděleně od ostatních částí provádět jen v omezené míře. Odpovědí na tento problém musí být model zahrnující vzájemné vztahy jednotlivých veličin.

Takto bychom mohli pokračovat, nicméně z několika uvedených příkladů je zřejmé, jaký druh událostí tvoří obslužnou složku TTSF a jak je tato složka ovlivněna změnou v obecných charakteristikách individuálního chování jednotlivců.

### 7.3.3 Dostupnost stanice

Nezanedbatelným faktorem souvisejícím se stranou nabídky je dostupnost nabíjecích stanic, a to ze dvou hledisek. V první řadě je nutné určit, jaká je dostupnost stanice z hlediska technické funkčnosti stanice. V druhé řadě je pak nutné uvažovat, jaká je dostupnost stanice z hlediska práva stanici používat.

Technickou funkčností je myšlena schopnost stanice vůbec *být v provozu*, tedy to, zda stanice zaznamenaná v databázi už skutečně poskytuje nabíjecí služby, nebo zda jde o stanici, která má být teprve vybudována. Rovněž lze do této kategorie zařadit případ, kdy stanice sice již byla postavena, ale například prochází technickou údržbou, tedy její schopnost poskytovat nabíjecí službu je dočasně buď omezena, nebo dokonce zcela pozastavena. V databázi nabíjecích stanic se tento aspekt bude projevovat jako změna aktuálního stavu stanice v čase (například z *operational* na *not operational*, případně pak z *planned for future* na *operational*).

Právo k použití stanice se odkazuje na fakt, že ne všechny stanice mohou být používány všemi majiteli vozidel. Použití některých stanic může být vázáno na právo stanici používat, které ovšem nemusí být uděleno všem lidem, ale pouze vybrané, konkrétně definované skupině. Může se jednat o zaměstnance určité instituce, jejich zákazníky, získání práva může být podmíněno registrací. V databázi nabíjecích stanic bude právo k užití nabíjecí stanice specifikováno různými stupni a typy, např. *public / membership / private*.

U obou typů dostupnosti platí, že aktuální stav dostupnosti nemusí být znám. V takovém případě bude databáze obsahovat u jedné či druhé položky hodnotu *unknown*, přičemž ta musí být zpracována separátně. Stanice s neznámou dostupností mohou být buď vyřazeny, nebo bude dostupnost nějakým způsobem simulována.

### 7.3.4 Kompatibilita vozidla a konektoru

Kompatibilita propojení vozidel a nabíjecích stanic je důležité téma zejména při návrhu nových technologií nabíjení a při tvorbě legislativních opatření upravující používané technologické standardy. Z hlediska modelování nabídky není příliš možné (a ostatně to ani není záměrem) zasahovat či nějak ovlivňovat případnou existující nekompatibilitu. Je však vhodné pozastavit se nad tímto faktorem a stručně zhodnotit, jakým způsobem může být jeho prostřednictvím nabídka nabíjecí služby ovlivněna.

Nejprve uvedme, že problém kompatibility souvisí s vývojem technologie nabíjení a následně pak její implementací do produktů dostupných na trhu, ať již se jedná o produkty na straně vozidel, nebo produkty na straně nabíjecích stanic. Problém s kompatibilitou vychází z faktu, že na trhu neexistuje jediná, všeobecně používaná technologie propojení stanic a vozidel při jejich nabíjení, kterou by používaly všechny tržní subjekty. Technologií nabíjení je více druhů a tento fakt tvoří jádro problému s jejich vzájemnou kompatibilitou. Pro ilustraci uvedme [189], kde se autoři zabývají mimo jiné právě různorodostí v nabíjecích technologiích.

Smyslem této kapitoly není v žádném případě pojednat o aktuálním stavu problematiky s kompatibilitou nabíjecích technologií. To je zevrubně pokryto v rešeršní části, kde je uveden jejich výčet a stručná charakteristika zasazená do kontextu aktuálního evropského prostředí. Zde však musíme prozkoumat, do jaké míry se tento faktor nekompatibility technologií může, popř. by měl, promítnout do modelu nabídky.

Z obecného pohledu bude nižší kompatibilita technologií bránit nabídce uspokojovat adekvátně poptávku. Tento stav se na mikro úrovni projevuje tak, že například vozidlo schopné používat k nabíjení technologii A bude mít k dispozici ze sítě nabíjecích stanic pouze ty stanice, které budou podporovat rovněž technologii A. Pro toto vozidlo pak bude reálná nabídka nabíjecí služby menší než by byla, kdyby toto omezení z důvodu nekompatibility neexistovalo a dané vozidlo mohlo užívat všechny nabíjecí stanice dostupné na daném území. Z makro pohledu se toto omezení kladené na schopnost nabídky uspokojovat poptávku promítne podobně jako prostorový nebo časový faktor z kapitol 7.3.1, resp. 7.3.2, tzn. nedostatek nabíjecí služby s nabíjecí technologií A se bude muset substituovat navýšením prostorové hustoty nebo výkonu nabíjecích stanic s touto technologií. Problém lze vidět také tak, že kvůli existenci každé z technologií vzniknou na trhu částečně oddělené samostatné segmenty, kde interakce nabídky a poptávky bude do jisté míry oddělená. Pouze částečně oddělené budou tyto segmenty proto, že pokud určitá stanice bude schopna dodávat službu na technologii A i B (případně dalších), pak bude její nabídka zasahovat do všech příslušných segmentů. Poptávat její služby tak budou moci vozidla pracující s technologií A, stejně jako vozidla pracující s technologií B. Analogicky toto platí i pro stranu poptávky, tedy vozidla. Zřejmě platí, že jestliže všechna vozidla budou kompatibilní se všemi typy technologií existujícími na trhu a současně všechny stanice budou schopny poskytovat nabíjecí službu pomocí všech typů technologií, pak situace bude stejná, jako kdyby na trhu existovala pouze jediná technologie, tedy problém s kompatibilitou bude mít nulový efekt. Pokud ale u alespoň jedné dvojice (vozidlo, stanice) bude platit, že průnik jejich podporovaných technologií je prázdná množina, pak bude problém s kompatibilitou technologií mít nenulový efekt.

Tento efekt kompatibility lze modelovat jak na mikro úrovni jednotlivých nabíjecích událostí, tak na makro úrovni jejich agregovaného výsledku. Na obou úrovních je ovšem nutné znát velké množství velmi detailních informací o nabíjecí infrastruktuře, vozidlech a uskutečněných nabíjecích událostech. Pro mikro úroveň by bylo nutné znát technologii, kterou využívají jednotlivá vozidla a současně území, na kterém se tato vozidla pohybují a kde tedy poptávají nabíjecí službu. Zároveň by bylo nutné znát technologické možnosti

každé z jednotlivých nabíjecích stanic. Na makro úrovni by pak bylo nutné znát alespoň statistiku, v jaké míře je určitá technologie zastoupena na straně poptávky a straně nabídky. Pochopitelně model postavený na makro úrovni by poskytoval podstatně méně přesné závěry.

Když se ovšem podíváme na dostupná data, tak zjistíme, že ta neobsahují ani informace pro tvorbu makro modelu. Například v databázi nabíjecích stanice je sice uveden typ stanice, ovšem často chybí informace o typu konektoru. Ještě horší situace je na straně vozidel, kde neexistují ani přibližné statistiky o konektorech, které jednotlivá vozidla používají. V centrálním registru vozidel [178] se stěží dočteme, jaké má vozidlo pohon, tedy zda jde o vozidlo elektrické, hybridní nebo se spalovacím motorem. Informace o typu konektoru zde zcela chybí. Tuto informaci by sice v principu šlo zjistit přes parametr výrobce, model a rok výroby vozidla, kde přes propojení na statistiky výrobce by snad bylo možné odvodit typ konektoru, ovšem náročnost tvorby takového propojení ve srovnání s jeho přínosem není příliš povzbudivá. Získaná data by bylo možné použít stejně jen pro velmi nepřesný makro model.

Problém s modelováním efektu kompatibility technologií mezi vozidly a stanicemi se zdá natolik složitý a jeho výsledek nepřesný, že je nutné položit si otázku jeho přínosu pro model nabídky. Jestliže se podíváme na problém z časového hlediska, pak lze s opatrností říct, že význam problému s kompatibilitou v čase klesá. V počátcích rozvoje elektromobility existovalo množství vzájemně nekompatibilních technologií, které se vyskytovaly vždy samostatně jak na vozidlech, tak na nabíjecích stanicích. S postupem času se však tento problém začal stávat čím dál zřejmější, takže výrobci vozidel i výrobci nabíjecích stanic začali implementovat do svých výrobků více existujících technologií, přičemž volili takové, které používá velká část „protistrany“. K tomu vznikaly legislativní úpravy doporučující určitou jedinou technologii, což spolu s předchozím mělo ten efekt, že se nabíjecí technologie přirozeně harmonizovaly. Tento proces lze očekávat i v budoucnosti, minimálně na relevantním území (EU). To znamená, že problém s kompatibilitou technologií bude postupem času ztrácet na síle dopadu, až snad časem zcela vymizí. Zohlednění kompatibility technologií jako významného faktoru v modelu nabídky by tak stejně mělo pouze dočasný pozitivní efekt.

### **7.3.5 Neoptimální používání vozidla**

Posledním uvažovaným faktorem vychází z toho, že podmínka racionality uživatele vozidla nemusí být nutně vždy splněna. Racionalitou uživatele v kontextu jeho cestovních zvyklostí se zde rozumí zejména záměrná volba nejkratší cesty mezi dvěma body – startovní pozicí a cílovou destinací. Tato podmínka se v práci chápe jako daná a implicitně se s ní pracuje v kapitole 6, kde je důležitou součástí modelu poptávky. Ten totiž obsahuje metriku založenou na nejkratší cestě mezi dvěma body, přičemž tato nejkratší cesta se považuje za tu, kterou (racionální) uživatel vozidla volí. V případě nabídky by se pak jednalo o chování uživatele u nabíjecí stanice. Racionalita v chování uživatele vozidla přijíždějícího k nabíjecí stanici spočívá v tom, že nabíjí své vozidlo, pokud je vybité, nestojí ve frontě, tj. nečeká u obsazené stanice, nepoužívá nabíjecí

stanice jako parkovací místo a toto chování je homogenní přes všechny uživatele. Problém je, že takové podmínky striktně omezující modelové chování uživatele mohou mít dramatické dopady na realističnost modelu. Otázkou však je, zda je možné obejít se bez nich. V následující argumentaci bude zkoumán koncept racionality uživatele vozidla spíše z hlediska strany poptávky. Závěry však budou obdobně platné i pro racionalitu chování vztahujícího se striktně k nabídkové straně problému.

V první řadě uveďme důvody zavedení této kontroverzní podmínky racionality. Podobná opatření, a jinak tomu není ani v tomto případě, se zavádí v procesu modelování ani ne tak proto, že by bylo cílem budovaný model zjednodušit, ale aby bylo možné ho vůbec prakticky postavit a získat pro něj požadované datové zdroje. Racionalita uživatele vozidla ani tak neodkazuje na fakt, zda jsou uživatelé v nějakém smyslu skutečně racionální, ale řeší problém praktické nemožnosti získat údaje o uživatelské iracionalitě. Takové údaje bychom totiž museli mít k dispozici, aby bylo možné model poptávky sestavit bez zavádění diskutované podmínky.

Iracionalitou se v případě modelu poptávky rozumí jakékoliv chování, které by vybočovalo z konceptu volby nejkratší cesty mezi dvěma místy na cestovní trase uživatele. Do takové definice ovšem spadá prakticky jakékoliv jednání, které vyústí ve volbu jiné než obvyklé trasy. Nepředvídatelná variabilita takového typu se v datech nemůže projevit jinak než náhodný šum. Problém ovšem je, že není možné zjistit ani míru tohoto šumu – jsou výkyvy v poptávce na určitém místě ČR zanedbatelné, nebo naopak významné? Abychom dokázali tento problém nějak koncepčně uchopit, musíme se vrátit zpět až k samotnému návrhu poptávkového modelu.

Obdobné modely objevující se v literatuře bývají obvykle založeny na tzv. *origin-destination* (OD) datech z nějakého typu průzkumu cestovního chování uživatelů elektromobilů na určitém území. OD data mohou být různě obsáhlá a informačně různě bohatá. Jejich povaha je však daná – jde o záznamy konkrétních cestovních událostí, které uživatelé provedli v určitý den, čas a po určité trase. Jestliže se tyto jednotlivé individuální cestovní události agregují přes celé území a přes delší časový úsek, získá se detailní představa o cestovním chování uživatelů na daném území včetně periodických výkyvů, odchylek a zmiňovaného nepředvídatelného šumu. Z takových dat lze zjistit míru šumu, lze vytvořit model periodicity dopravy a lze vidět časový vývoj objemu dopravy. Vše navíc vztažené zcela přesně k určitému typu vozidla.

Problém je, že získat OD data je nesmírně obtížné, a i když se to v určitých případech povede, většinou se jedná o velmi krátký časový úsek nebo malé území, nejčastěji jedno město, případně skupinu sousedících měst. Pro ČR jako celek nejsou OD data k dispozici a není důvod domnívat se, že by v dohledné době mohla být. Z toho důvodu bylo potřeba spokojit se s kvalitativně nižšími typy dat, což jsou například agregovaná data z průzkumů dopravy. S daty této kvality se ovšem pojí několik komplikací. Předně, jde o data pojednávající o všech vozidlech, nikoliv elektromobilech, což implikuje nutnost určit, nakolik se cestovní chování uživatelů elektromobilů liší od chování uživatelů obecného typu osobních vozidel. Agregovaná data současně nejsou k dispozici

z prostorového a časového hlediska. Není k dispozici záznam, jaká byla hustota dopravy na všech silnicích ČR v různé časové okamžiky sledovaného období. Existuje pouze samostatný záznam o hustotě dopravy během dne, popř. během roku na všech silnicích zároveň a naopak, existuje záznam pouze o tom, jak ve dnech průzkumu sčítání dopravy byly jednotlivé sledované silnice vytiženy. V datech takovéto kvality není možné dostatečně přesvědčivě rozpoznat iracionální šum vzniklý odchylkou od normálního stavu, který by definoval běžné rutinní agregované racionální chování uživatelů.

Analogicky v případě nabídky bychom pro zjištění míry iracionality rovněž potřebovali OD data uživatelů elektromobilů, ale navíc také data o chování uživatelů u samotných nabíjecích stanic. Je zřejmé, že oba typy podrobných dat není možné získat, tedy není možné měřit míru iracionality chápanou jako nepravidelnou odchylku od rutinního chování. A jestliže není možné měřit ani její míru, pak jakékoliv úvahy o zahrnutí iracionality do modelu poptávky či nabídky musí skončit neúspěchem. Ten však není způsoben neschopností vytvořit sofistikovanější model, ale nemožností získat pro model potřebná data v požadované kvalitě.

## 7.4 Model nabídky

Model nabídky je podobně jako model poptávky tvořen knihovnou spolupracujících funkcí.

### 7.4.1 Stažení, transformace a filtrace dat

Data jsou nejprve pomocí kratičkého skriptu `CSdownload.m` stažena z webu Open Charge Map prostřednictvím tamního API (viz kap. 7.2) jako XML soubor. Následně jsou transformována pomocí funkce `parseXML.m` do formátu *struct*, tj. strukturovaného datového typu MATLABu. Takto připravená jsou volána skriptem `CStransformData.m`, který provádí jejich transformaci a filtraci.

Data jsou v původním XML souboru a následně v MATLAB struktuře poměrně nepřehledně uložena. Ne všechny záznamy (stanice) mají stejný počet parametrů. Některé záznamy chybí, takže odpovídající listy nebo větve stromu u takového záznamu chybějí. Při procházení záznamů je pak nutné přiřadit k sobě odpovídající parametry. Zobrazení struktury pro účely vizuální reprezentace výsledků je poměrně nešikovné. Strukturu stromu nelze jednoduše zobrazit jako tabulku, kde řádky jsou jednotlivé záznamy a sloupce jejich vybrané parametry. To je ovšem žádoucí formát, proto skript `CStransformData.m` transformuje data na tabulkový formát. Ten je ostatně demonstrován již v tab. 5, data jsou v ní ale z typografických důvodů transponovaná, tabulka obsahuje parametry jedné stanice, tj. jde o jeden řádek z produkce popisovaného transformačního skriptu.

Bylo zjištěno, že data obsahují chyby, respektive že uvedený API dotaz vrátí stanice, které jsou mimo území ČR. V aktuální verzi datového souboru (podzim 2017) jde řádově o jednotky stanic na území Slovenska a Rakouska. Jsou nalezeny pomocí testu vzdáleností

od bodů silniční sítě ČR a pokud je tato vzdálenost excesivní, jsou tyto body vyfiltrovány. Obvykle je tento krok spojen s manuální detekcí a kontrolou, jelikož výrazná změna databáze nabíjecích stanic není příliš častá.

Následuje filtrace a kontrola dat. Filtrují se takové stanice, u nichž je explicitně zajištěna operabilita (status: *operational*) a veřejná dostupnost (availability: *public*). Stanice, u nichž je buď explicitně uvedeno, že jsou aktuálně neaktivní (nejčastěji se vyskytuje *planned for future*, tedy v daném místě ještě nestojí), nebo jsou explicitně neveřejné (například zcela soukromé, či firemní, pouze pro zaměstnance), jsou z datového souboru vyfiltrovány a nejsou dále uvažovány. Rovněž jsou vyfiltrovány stanice, kde operabilita či veřejná dostupnost nejsou explicitně uvedeny, tzn. kde chybí data. Takové opatření bylo zavedeno proto, aby se do modelu z tohoto datového zdroje nedostávala nejistota ve formě nepodložených spekulací o existenci či kvalitě nabíjecí služby, což by vedlo k nespolehlivosti modelu. Samozřejmě jsou vynechány i ty stanice, u nichž chybí klíčové technické parametry jako pracovní elektrický proud, napětí nebo počet konektorů. V tomto momentě jsou totiž data kontrolována z hlediska úplnosti a případným chybějícím nebo nesmyslným hodnotám je jednotně přiřazena hodnota *not-a-number* (NaN). Pokud data obsahují hodnoty NaN u klíčových technických parametrů, nebo neexistuje způsob, jak data odvodit, jsou takové záznamy vynechány. Data totiž obsahují vzájemně související parametry. Pokud je například deklarována kategorie stanice (tzv. *level*), pak je možné přibližně odvodit elektrické proudy a napětí. Pokud je uveden proud a napětí, pak je možné zařadit stanici do příslušné kategorie. Pokud však chybí všechny tyto parametry, nezbyvá než záznam odmítnout.

#### 7.4.2 Doplnění dat a technické parametry stanic

Ještě v rámci funkce `CSTransformData.m` následuje odvození chybějících parametrů a výpočet výkonu stanice. Výkon stanice, resp. jejích konkrétních přípojek, je klíčová veličina figurující dále v modelu interakce vozidel a nabíjecích stanic. Podle ní se stanovují parametry jako čas potřebný k dobití chybějící kapacity vozidla nebo priorit přípojných míst. Stanovuje se buď z parametrů stanice, pokud existují, nebo se odhaduje na základě kategorie stanice jako nejnižší výkon, který musí stanice v dané kategorii splňovat (např. pro nejrychlejší kategorii, tzv. Level 3 jde o 40 kW).

Následuje rozdělení stanic do jejich jednotlivých přípojných míst a přiřazení těmto místům správný výkon a jejich počet. Pojmem nabíjecí stanice je totiž identifikována každá unikátní lokalita v databázi nabíjecích stanic. Tato lokalita však může mít více typů nabíjecích zařízení a každé z těchto zařízení může existovat ve více kopiích. Tyto dva parametry jsou definovány v tab. 5 jako počet konektorů (*connections*) a množství nabíjecích zařízení daného typu (*quantity*). Počet konektorů tedy udává, kolik vozidel je možno na jediné nabíjecí zařízení napojit, počet nabíjecích zařízení udává počet zařízení v dané lokalitě, tedy příslušné dané nabíjecí stanici. Vynásobením počtu konektorů a počtu nabíjecích zařízení dostáváme celkový počet přípojných míst stanice, nicméně je nutné správně přiřadit výkonové parametry jednotlivým přípojným místům.



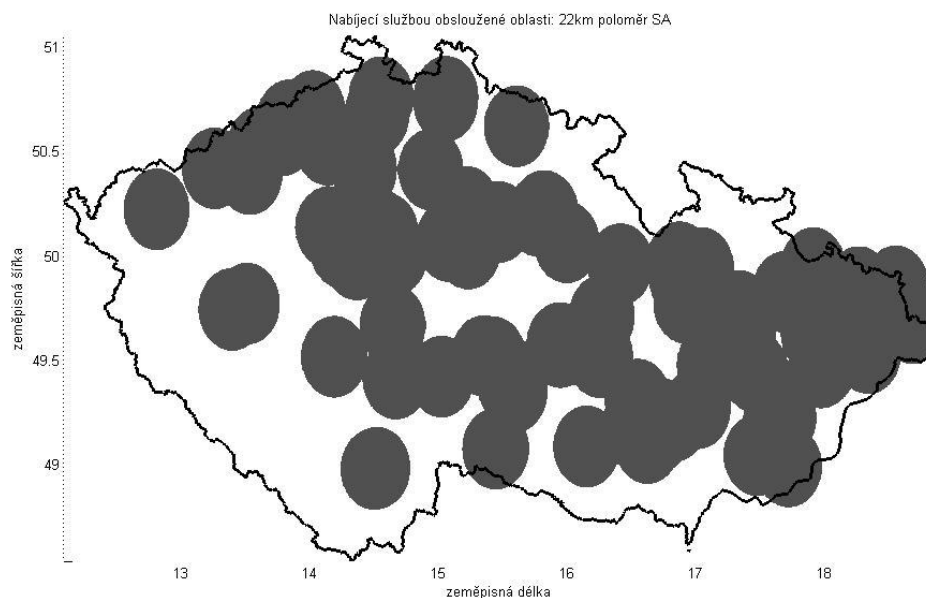
Takto připravené pole obsahující vyfiltrovaná a rozdělená data je ukládáno do souboru na disk. Zde totiž platí, že skripty `CSdownload.m` a `CStransformData.m` jsou zamýšleny na občasné jednorázové použití. Pokud je vezmeme jako celek, pak jejich vstupem je Open Charge Map online databáze reálných nabíjecích stanic a výstupem je zformátovaný a pročištěný datový soubor těchto stanic vyskytující se v online databázi v daném okamžiku. Protože se databáze stanic příliš často nemění a celkový import spolu s transformací je relativně výpočetně náročný, jsou tyto skripty volány ad hoc, pro manuální aktualizaci dat v případě potřeby.

### 7.4.3 Grafická reprezentace

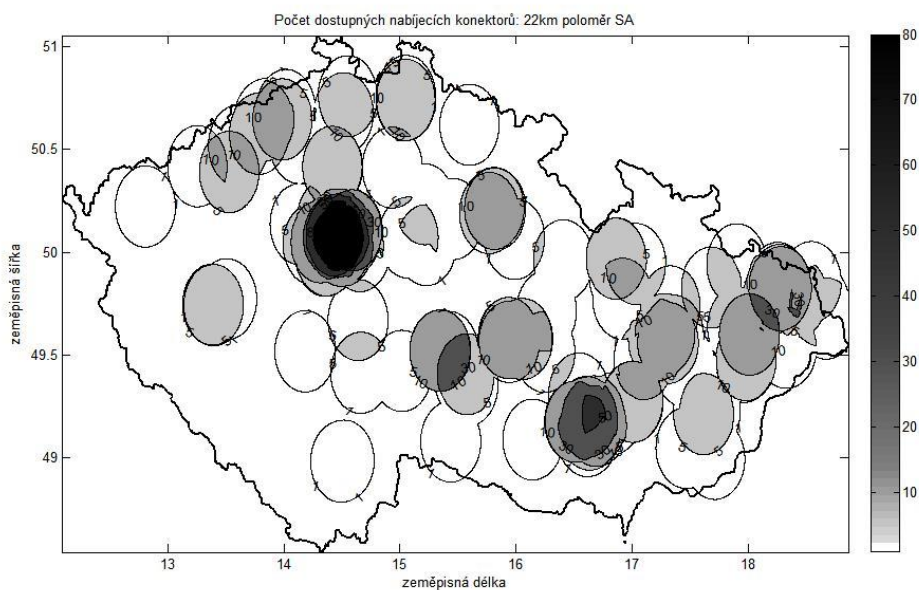
Poslední funkcí modelu nabídky je

```
[SAunion, XI, YI] = CSmodel(rmax)
```

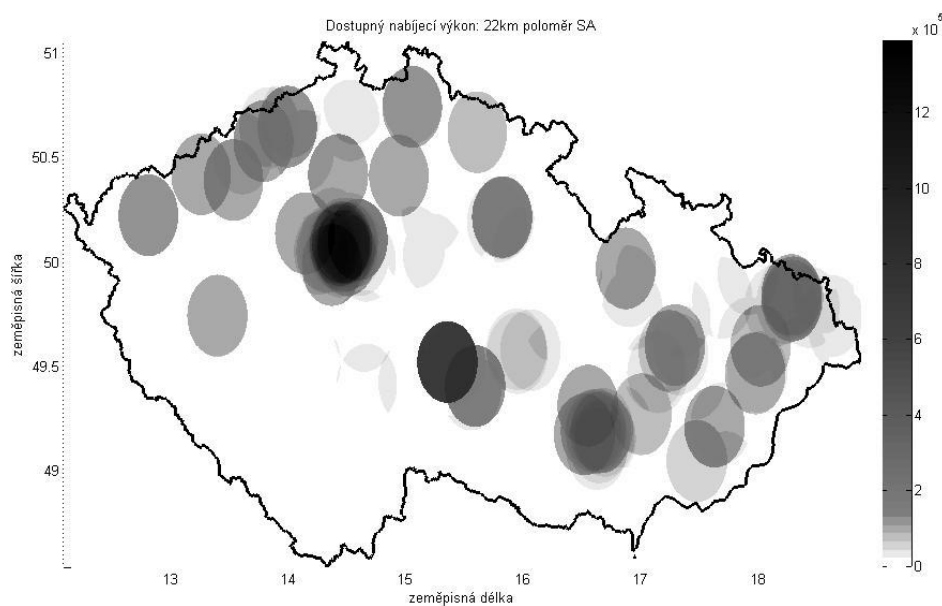
Tato funkce pracuje s datovým souborem výstupu `CStransformData.m` a využívá jej zejména ke grafické reprezentaci aktuální nabídky nabíjecí služby. Je vytvořeno několik map s různým typem překrytí. Nejdůležitější z nich je mapa celkové plochy pokryté nabíjecí službou představující sjednocení jednotlivých SA z obr. 25. Čtenáři tato mapa poskytuje představu, kolik rozlohy ČR je obslouženo a o které oblasti se jedná. Obr. 25 je pro úroveň poloměru SA  $r_{max} = 22$  km, což odpovídá hodnotě  $d_{max} = 50$  km při hladině  $\omega = 0,95$  pakliže uvažujeme vztah z rov. 15. Analogicky je pro stejný parametr  $r_{max}$  vykreslena mapa celkového počtu dostupných konektorů, znázorněna na obr. 26, a celkový dostupný výkon stanic na obr. 27.



Obr. 25: Oblasti obsloužené existujícími stanicemi  
(Zdroj: vlastní zpracování, pomocí `CSmodel.m`)



Obr. 26: Počet dostupných nabíjecích konektorů  
(Zdroj: vlastní zpracování, pomocí CSmodel.m)



Obr. 27: Kumulativní dostupný výkon nabíjecích stanic  
(Zdroj: vlastní zpracování, pomocí CSmodel.m)

Kromě grafické reprezentace nabídky je účelem funkce CSmodel.m vrátit jako výstup mesh mřížku celkové obslužené oblasti, tedy sjednocení všech SA, což je ta, kterou představuje obr. 25, a k ní navíc souřadnicové mřížky odpovídající oblasti.

## 8 Simulátor nabíjení

Vytvořené modely poptávky a nabídky byly zamýšleny jako samostatné architektonické celky, jejichž výstupy budou vstupovat do simulátoru jejich vzájemné interakce. Toto můžeme chápat podobně jako dva stěžejní nástroje ekonomické teorie, totiž křivku nabídky a poptávky. Ty jsou samostatnými modely, které spolu interagují v modelu tržní interakce. Podobně jako interagují tradiční křivky poptávky a nabídky v jediném grafickém modelu, analogicky interagují výše navržené modely poptávky po nabíjecí službě a její nabídky v modelu simulovaného nabíjení.

Na tento model může být v textu někdy odkazováno jako na model hromadné obsluhy, případně model interakce vozidel a stanic. To sice zdánlivě může snižovat terminologickou jednoznačnost, tato označení jsou však v případě navrženého modelu synonymy. Důvod této skutečnosti je popsán v kapitole 8.5 pojednávající o jádru samotného modelu a jeho principu.

V následujících samostatných kapitolách jsou popsány postupně dílčí komponenty modelu. V poslední kapitole 8.5 je pak z těchto dílčích komponent poskládán celkový obraz.

### 8.1 Technické parametry nabíjecích stanic

Technické parametry stanic jsou z pohledu navrhovaného modelu hromadné obsluhy konstantní, nezávislé na čase, nepodléhající náhodě. Jsou získány z databáze nabíjecích stanic (kap. 7.2), pročištěny, smysluplně formulovány funkcemi modelu nabídky (kap. 7) a připraveny pro užití v modelu hromadné obsluhy.

Jakmile jsou data vyčištěna, zbývá  $n$  stanic. Bylo by sice možné hovořit o tomto počtu jako o konstantě obecně to ovšem není praktické, a to ze dvou důvodů. Zaprvé, databáze stanic je neustále aktualizována, tedy počet skutečných stanic se může v čase lišit (v době psaní této kapitoly se jednalo o 123 skutečných stanic, o přibližně 6 měsíců později to už bylo 148 stanic). Zadruhé, celkový počet stanic je předmětem optimalizace, tedy proměnlivost jejich počtu je klíčovým faktorem celé práce. Data předkládaná modelem nabídky jsou již transformovaná. Neobsahují už technické parametry stanice v surové podobě, ale jen ty relevantní, totiž výkon a počet konektorů každé z úrovní výkonu. Záznam pro každou stanicí tedy poskytuje informace o  $\sum_{i=1}^p q_i$  konektorech, kde  $p$  je počet výkonnostních úrovní stanice a  $q_i$  je množství konektorů na každé výkonnostní úrovni.

### 8.2 Generátor příjezdů

Cílem této funkce je vytvořit datovou strukturu, která obsahuje časy příjezdů celkem  $m$  vozidel během jednoho dne ke každé z  $n$  stanic, která v daný den existuje a je považována za aktivní (*operational*). Funkce očekává intenzitu dopravy na jednotlivých stanicích jako vstup. Intenzitou dopravy na stanici je myšlen průměrný očekávaný počet vozidel, který přijede na stanici v jeden den. Tento počet však nemusí být celé číslo, v drtivé většině

případů je tento počet neceločíselný, například 2,68. To znamená, že během jednoho dne přijedou ke stanici 2 vozidla a s pravděpodobností 0,68 přijede také vozidlo třetí. Ve výstupu generátoru příjezdů se tato skutečnost projevuje tak, že v některé dny (některá spuštění funkce) jsou vygenerována 2 vozidla a v některé dny 3. Poměr dnů, kdy jsou vygenerována 2 vozidla ke dnům, kdy jsou vygenerována 3 by přesně odpovídal uvedené pravděpodobnosti 0,68.

```
[arrivalTimes] = generateArrivals(stationDemandPerDay)
```

Funkce využívá generátor diskretních událostí pracující s funkcí hustoty pravděpodobnosti. Ta je odvozena zejména od statistiky variace denní intenzity dopravy pro osobní vozidla v ČR uvedené v [195]. Jak však uvádí kapitola 6.3.2 o časovém modelu poptávky, samotná tato statistika by nestačila a tak funkce `generateArrivals()` pracuje přímo s výstupem časového modelu poptávky, resp. výstupem `timeDemandModelMerge.m`, který je časovou řadou poptávky po nabíjecí službě. Tento datový soubor může obsahovat arbitrární časové období, smysluplné hodnoty však lze získat až po roce 2009. Model poptávky pracuje na reálných datech do konce roku 2016, pro období od začátku roku 2017 jde o extrapolaci. Okno reálných dat je pochopitelně v čase rozšiřitelné. Jakmile bude dostupná statistika registrovaných vozidel pro rok 2017, okno reálných dat se rozšíří a okno extrapolace vznikne od roku 2018 dále. Data a grafika v této kapitole byly vytvářeny na konci roku 2017, proto data za rok 2017 ještě nemohla být do výstupů zakomponována.

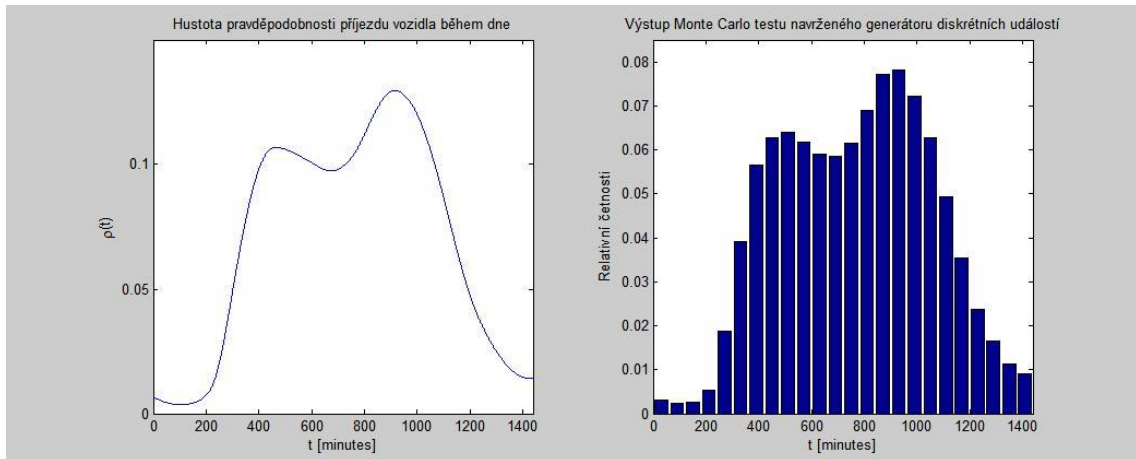
Datový soubor produkovaný modelem poptávky poskytuje minutová data. Nejde ani tak o přesnost samotné hodnoty v daném čase, jako spíš o schopnost na těchto datech postavit reálný model příjezdů. Pokud by vzorkovací jemnost dat byla hodinová, model příjezdů by byl příliš hrubý, zvláště pro malé kapacity baterií a velké výkony nabíjecích stanic. Vezměme výstup časového modelu poptávky, uvažujme jeho podmnožinu reprezentující jeden konkrétní den a nazvěme těchto 1440 hodnot  $I(t)$ . Jde o funkci hodinové intenzity poptávky po nabíjecí službě závislé na čase. Pokud funkci  $I(t)$  normujeme tak, aby platila rov. 26, pak ji můžeme ztotožnit s hustotou pravděpodobnosti  $\rho(t)$  příjezdu vozidla k nabíjecí stanici v různé časové okamžiky jednoho dne, jestliže zároveň předpokládáme, že pravděpodobnost příjezdu vozidla ke stanici v tento den je rovna 1.

$$\int_0^1 I(t)dt = 1 \quad \text{Rov. 26}$$

Uvedená funkce hustoty pravděpodobnosti  $\rho(t)$  je založena na skutečných datech o elektromobilech pro ČR a statistice veřejných nabíjecích událostí. Tato data ovšem vychází z intenzity dopravy všech vozidel, nikoliv z časového rozložení nabíjecích událostí elektromobilů. Časové rozložení nabíjení elektromobilů na veřejných nabíjecích stanicích pro ČR bohužel není známo, v odborné literatuře ovšem panuje shoda, že časové rozdělení nabíjecích událostí je velmi podobné s intenzitou dopravy, zejména pokud jde o veřejné nabíjecí stanice. Například Spoelstra [205] uvádí na str. 23 histogramy

nabíjecích událostí (jejich začátky a konce) v průběhu dne. Nutno konstatovat, že Spolstrova statistika nizozemských nabíjecích událostí z hlediska časového rozložení během dne prakticky bezchybně kopíruje hodnotu získané funkce  $I(t)$ .

Generátor diskretních událostí pak funguje na principu Monte Carlo na základě hustoty pravděpodobnosti  $\rho(t)$ . Obr. 28 znázorňuje tuto funkci (vlevo) a relativní četnosti výstupu navrženého generátoru diskretních událostí založené na této funkci (vpravo).



Obr. 28: Funkce hustoty pravděpodobnosti (vlevo), výstup Monte Carlo simulace navrženého generátoru diskretních událostí (vpravo)  
(Zdroj: vlastní zpracování, MATLAB, scrCustomPlot.m)

Výstupem generátoru příjezdů je tedy  $n$  skupin obsahující časy příjíždějících vozidel  $A_i$ . Ukázka takové struktury je v tab. 6.

Tab. 6: Ilustrativní výstup generátoru příjezdů `generateArrivals`

vozidlo	voz. 1		voz. 2		voz. 3		voz. 4	
	hod	min	hod	min	hod	min	hod	min
St. 1	10	43	16	53	9	37		
St. 2	14	13						
St. 3	21	4	13	13	7	27		
St. 4	7	38	14	22				
St. 5	17	56	6	6	5	21	16	4
...	...	...	...	...	...	...	...	...
St. n-1								
St. n	8	55	17	43	15	0		

(Zdroj: vlastní zpracování, MATLAB, `generateArrivals.m`, Excel)

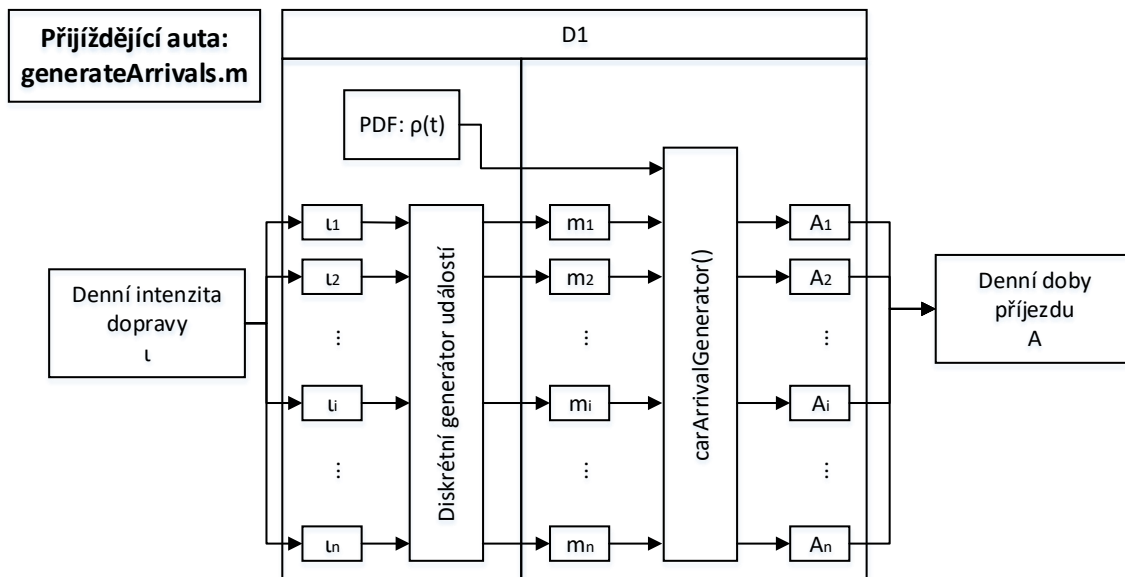
Skupin je tedy stejně jako nabíjecích stanic, celkový počet vozidel ve všech stanicích dohromady je  $m$ , resp. se k tomuto číslu blíží při opakovaném pouštění generátoru. K jednotlivým stanicím může každý den příjíždět proměnlivý počet vozidel. Tento počet se však nemůže lišit o více než 1 vozidlo, jelikož náhoda, tedy nejednotková

pravděpodobnost příjezdu, je aplikována pouze na poslední vozidlo, nikoliv na všechny. Výstup generátoru příjezdů  $A_i$  lze tedy shrnout pomocí rovnic rov. 27 a rov. 28.

$$m_i = \lfloor l_i \rfloor + P(l_i - \lfloor l_i \rfloor) \quad \text{Rov. 27}$$

$$A_i = \text{carArrivalGenerator}(m_i, \rho(t)) \quad \text{Rov. 28}$$

$l_i$  je denní intenzita dopravy na stanici  $i$ ,  $m_i$  je celočíselný počet přijíždějících vozidel ke stanici  $i$ . Funkce  $\lfloor \cdot \rfloor$  je tzv. *floor* funkce, tedy dolní celá část čísla.  $A_i$  jsou časy příjezdů  $m_i$  vozidel ke stanici  $i$  a  $\rho(t)$  je výše popsaná funkce hustoty pravděpodobnosti příjezdů. Diagram na obr. 29 znázorňuje tento model graficky.



Obr. 29: Grafické znázornění generátoru příjezdů `generateArrivals` (Zdroj: vlastní)

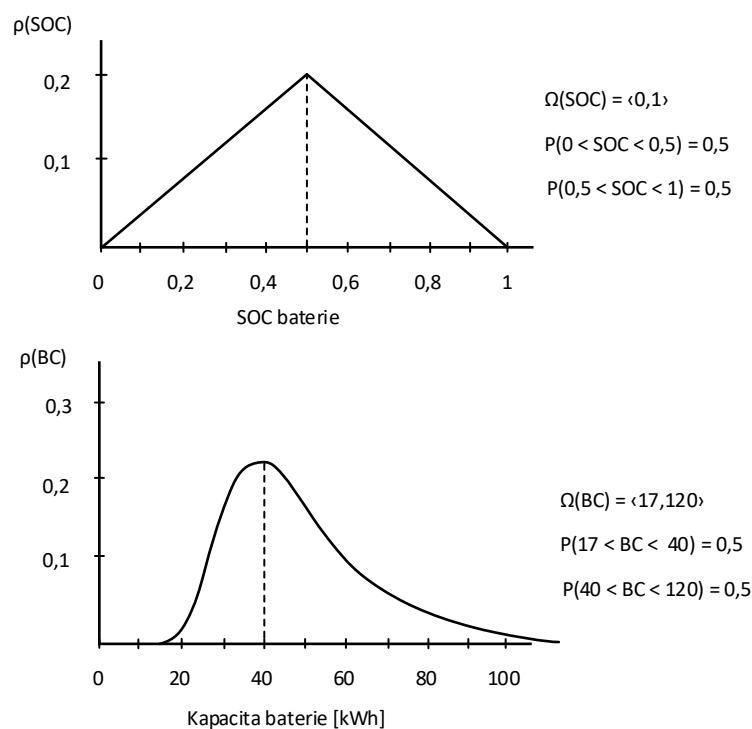
### 8.3 Generátor požadované kapacity nabíjení

Pro realističnost modelu hromadné obsluhy nestačí pouze simulovat časy příjezdů, je potřeba vzít v potaz, že vozidla nejsou homogenní. Zde by se dala aplikovat celá řada parametrů, které by specifikovaly heterogenitu vozidel, nicméně z praktického hlediska není možné do modelu zahrnout všechny. Model proto obsahuje jen nejvýznamnější parametry, tj. požadovanou kapacitu nabíjení. Jde o množství elektrické energie (vyjádřené v kWh), které je potřeba k dobití baterie vozidla do 100 %. Požadovaná kapacita baterie ovšem není deklarována přímo, jelikož jde o odvozenou proměnnou, je deklarována pomocí stavu baterie, tzv. *state of charge* (SOC), a celkové kapacity baterie (BC).

```
[battery] = SOCgenerator(arrivalTimes)
```

Generátor požadované kapacity nabíjení, označen jako `SOCgenerator`, však nesimuluje pouze SOC, jak by napovídal název, jeho výstup je složitější. `SOCgenerator` je volán

až poté, kdy je znám konkrétní počet vozidel přijíždějící během dne k jednotlivým stanicím. Tento celkový počet byl v předchozích kapitolách označen jako  $m$ , přesněji potom  $m_i$ , tedy počet vozidel přijíždějící během dne ke stanici  $i$ . SOCgenerator tedy využívá čísla  $m_i$  a generuje právě tento počet záznamů o vozidlech, tzn. každé přijíždějící vozidlo dostane právě jeden záznam. Pro generování tohoto záznamu je využita funkce SOCfunction, která generuje dvojici hodnot podle příslušných funkcí hustoty pravděpodobnosti  $\rho(\text{SOC})$  a  $\rho(\text{BC})$  (obr. 30). Tyto funkce byly definovány na základě rešerše literatury, kde lze najít související výzkumy z různých zemí a období. Tento způsob byl volen proto, že bohužel neexistují empirická data pro současný stav v ČR, z nich by se daly tyto funkce přímo aproximovat. Výsledné funkce jsou proto umělé konstruované spíše podle jejich žádoucího tvaru než pomocí nějakého aproximačního algoritmu.



Obr. 30: Funkce hustoty pravděpodobnosti veličiny stav baterie (nahore) a veličiny kapacita baterie (dole)  
(Zdroj: vlastní zpracování)

Motivace za sestrojením uvedených hustot pravděpodobnosti (PDF) veličin SOC a BC je následující. PDF veličiny SOC reprezentuje fakt, že vozidla nebudou přijíždět ke stanici se stejným procentem zbývajících kapacity v baterii. Některá vozidla budou téměř vybitá (SOC nízký), některá budou mít své baterie téměř plné (SOC vysoký) a pouze budou chtít v rychlosti doplnit baterii před dlouhou cestou. Bohužel neexistuje výzkum, který by mapoval tato specifika nabíjecího chování majitelů elektromobilů v ČR, nicméně lze se alespoň inspirovat zahraničními studiemi. Brookerova práce [206] uvádí hledanou statistiku pro dva typy elektromobilů Nissan Leaf a Chevrolet Volt. Rozdílnost vozidel je především dána tím, že Leaf je plně elektrické vozidlo (PEV/BEV), kdežto Volt je hybrid

(PHEV). Uživatelé obou typů vozidel mají podobné chování, tj. své vozidlo nabíjí nejčastěji při SOC okolo 50 %, nicméně v případě uživatelů PHEV je tato statistika zamlžena faktem, že si mohou dovolit nechat svou baterii úplně vybit, čehož často využívají, konkrétně téměř v 55 % případů. Tuto možnost ovšem uživatelé BEV nemají, nemohou riskovat, že se stane jejich vozidlo nepojízdným. Zajímavý je také fakt, že nejvyšší hustota pravděpodobnosti je přesně v 50 %, resp. spadá do intervalu 50-60 % a není významně posunuta na jednu, či druhou stranu. Celkový tvar funkce lze bezpochyby označit jako trojúhelníkový, kdy nejvyšší hustota pravděpodobnosti dosahuje hodnoty 0,2. Podobnou statistiku uvádí i Franke [207], ovšem jeho funkce není zdaleka tak „hladký trojúhelník“ jako v případě Brookera, to však může být způsobeno nízkým počtem (70) respondentů. Autoři studie [208] uvádějí statistiky používání vozidel v USA z hlediska množství denně ujetých kilometrů. Podobná statistika je obsažena i v [209], kde se autoři navíc opírají o detailní OD data z oblasti italského Říma. Velmi precizní model veličiny SOC je poskytnut v [210], kde je na datech japonských uživatelů získána křivka SOC velmi podobná předešlé Brookerově. Na tomto základě se dá konstatovat, že navržený tvar PDF veličiny SOC z obr. 30 je sestavený správně.

Pro veličinu kapacita baterie (BC) rovněž nejsou empirické důkazy z prostředí ČR. Z podstaty veličiny však není příliš vhodné, aby byl článek opřen o zahraniční data. To proto, že kapacita baterie vozidel v ČR je definovaná složením vozového parku z hlediska konkrétních modelů PEV provozovaných na území ČR. V jiné zemi, kde je jiná tržní nabídka, preference zákazníků, jejich kupní síla atd. bude složení vozového parku jiné (porovnejme např. stát Kalifornie s ČR). Uživatelé z bohatších zemí západní Evropy a USA si budou moci dovolit dražší modely s vyšší kapacitou baterie, uživatelé v asijských zemích, například z Číny, budou využívat domácí značky s nízkou kapacitou, tamní zákazník bude využívat vozidlo jiným způsobem než zákazník evropský, a ještě jinak než zákazník český. Detailní diskuzi na toto téma lze nalézt v samostatné kapitole 6.4.4 o chování zákazníků. Faktem zůstává, že pokud není známa struktura vozového parku v ČR, není možné empiricky dostatečně robustně podložit hledanou funkci. Jistou nápoředu by mohly dát statistiky registrovaných vozidel v ČR [178], v nich se ovšem uvádí pouze typ motoru, tedy fakt, že jde o PEV. Chybí v nich statistika o velikosti baterie a z uvedeného modelu nelze vyvozovat žádné exaktní závěry už proto, že z hlediska uživatele jde o statistiku deklaratorní a data obsahují velké množství chyb.

Nicméně, po nějaké době usilovného prohledávání dostupných datových zdrojů a korespondenčního úsilí byla data koncem roku 2017 v požadované kvalitě nakonec nalezena. Po doporučení od redakce webu EV Obsession [42] byla kontaktována švédská společnost EV volumes.com [50] provádějící analýzy a konzultace v oboru elektromobility. Tato společnost nabídla autorovi požadované statistiky závislosti mezi kapacitou baterie a množstvím prodaných elektromobilů v kategorizaci podle země za poplatek 1500 USD. Poplatek byl však shledán příliš vysoký na to, že takto získaná data by přispěla pouze ke zpřesnění drobné, dílčí části modelu. Přesto je vhodné na tento datový zdroj upozornit pro případné zájemce z řad čtenářů.

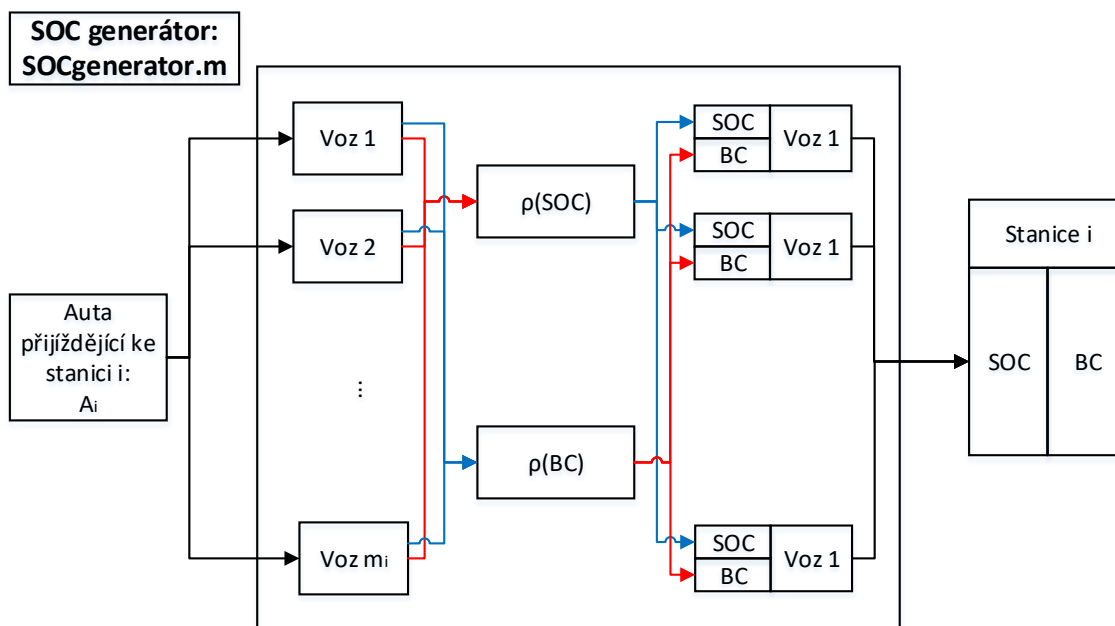


Jelikož spolehlivá empirická data získána nakonec nebyla, nezbylo než tato data nahradit kvalifikovaným odhadem, z čehož vyplynula uvedená PDF pro veličinu BC. Při její konstrukci bylo předpokládáno, že nejčastější velikost baterie na trhu je přibližně 40 kWh (vychází ze statistik oblíbenosti modelů PEV, např. [211]). Rovněž bylo předpokládáno, že baterie pro plně elektrické vozidlo nebude menší než 15-20 kWh (konkrétně použito 17 kWh) a nebude větší než 120 kWh (největší kapacitu mají vozidla značky Tesla aktuálně dosahující 100 kWh, vyšší kapacita je rezerva pro případné odvozené modely). Současně byl zaveden předpoklad, že vozidel s kapacitou nižší než 40 kWh je stejně jako vozidel s kapacitou vyšší než 40 kWh. Předpoklad, že hranice rozdělující vozový park na poloviny z hlediska kapacity baterie je právě 40 kWh lze sice podrobit kritické diskuzi, nicméně při neexistenci dat je tato hranice vhodná jako každá jiná. Jakmile budou k dispozici skutečná data, lze funkci `SOCfunction` podle nich velmi snadno modifikovat. To ostatně platí pro celý navržený model hromadné obsluhy.

Pro odhad veličiny BC ve výstupu funkce `SOCfunction` je použita funkce pravděpodobnostního gama rozdělení  $\Gamma(X, \alpha, \beta)$  s parametry uvedenými v rov. 29. Parametr  $s$  zajišťuje horizontální posunutí funkce, aby růst její hodnoty nezačínal pro  $BC = 0$  kWh a parametry  $\alpha$  a  $\beta$  definují její tvar. Rozdělení  $\Gamma$  s těmito parametry velmi dobře aproximuje podmínky kladené na  $\rho(BC)$ , jak je patrné z obr. 30 (dole).

$$\begin{aligned} &\Gamma(X + s, \alpha, \beta) \\ &s = 15 \\ &\alpha = 4,2 \\ &\beta = 7,9 \end{aligned} \qquad \text{Rov. 29}$$

Funkce `SOCfunction` tedy vrací dvojici hodnot, tj. SOC a BC pro konkrétní vozidlo. Generátor `SOCgenerator` ji pak volá  $m_i$ -krát, což se projeví ve výstupu generátoru jako matice dat, jejíž řádky jsou záznamy jednotlivých vozidel a sloupce obsahují SOC a BC těchto vozidel. Obr. 31 graficky zachycuje fungování generátoru. Výstup generátoru definuje požadovanou kapacitu nabíjení, tedy chybějící množství energie v baterii příjíždějících vozidel, které má za úkol nabíjecí stanice doplnit.



Obr. 31: Grafické znázornění generátoru požadované kapacity nabíjení SOCgenerator (Zdroj: vlastní)

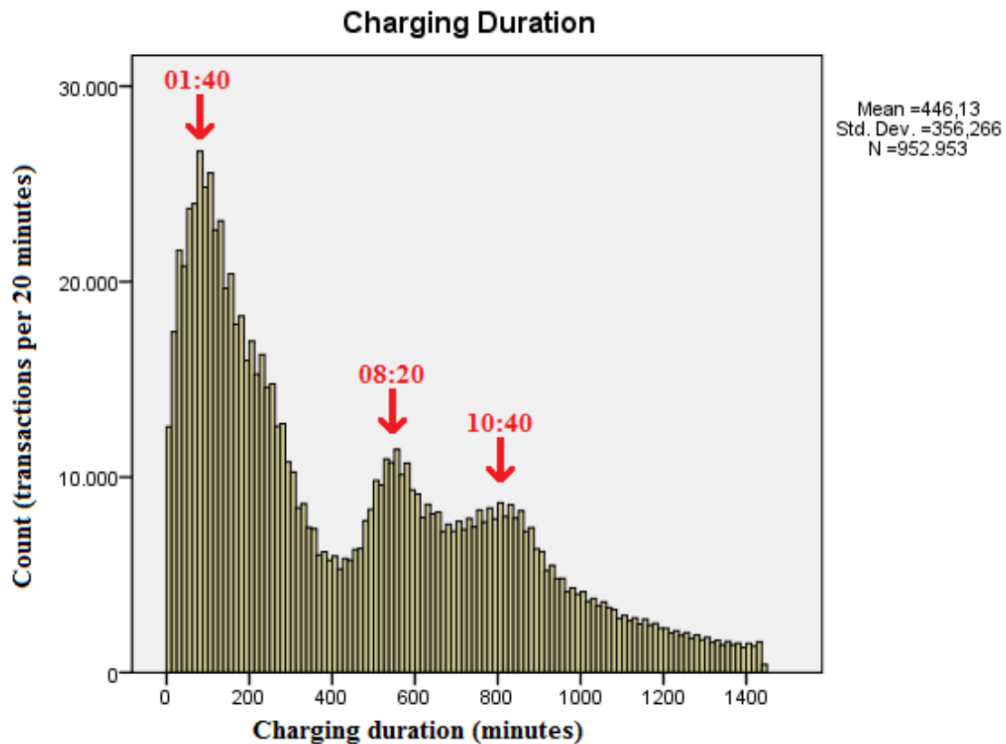
## 8.4 Generátor pobytu

Simulace přijíždějících vozidel byla diskutována v kap. 8.2. Vozidlo v systému (připojené k nabíjecí stanici) ovšem nezůstává trvale. Analogicky k události příjezdu je nutné namodelovat také simulaci události odjezdu vozidla od stanice. Tato kapitola představuje generátor pobytu, respektive generátor délky nabíjecí události, ze které (spolu s časem příjezdu) je čas odjezdu vypočten.

```
[CT] = carDepartureGenerator(reqCT)
```

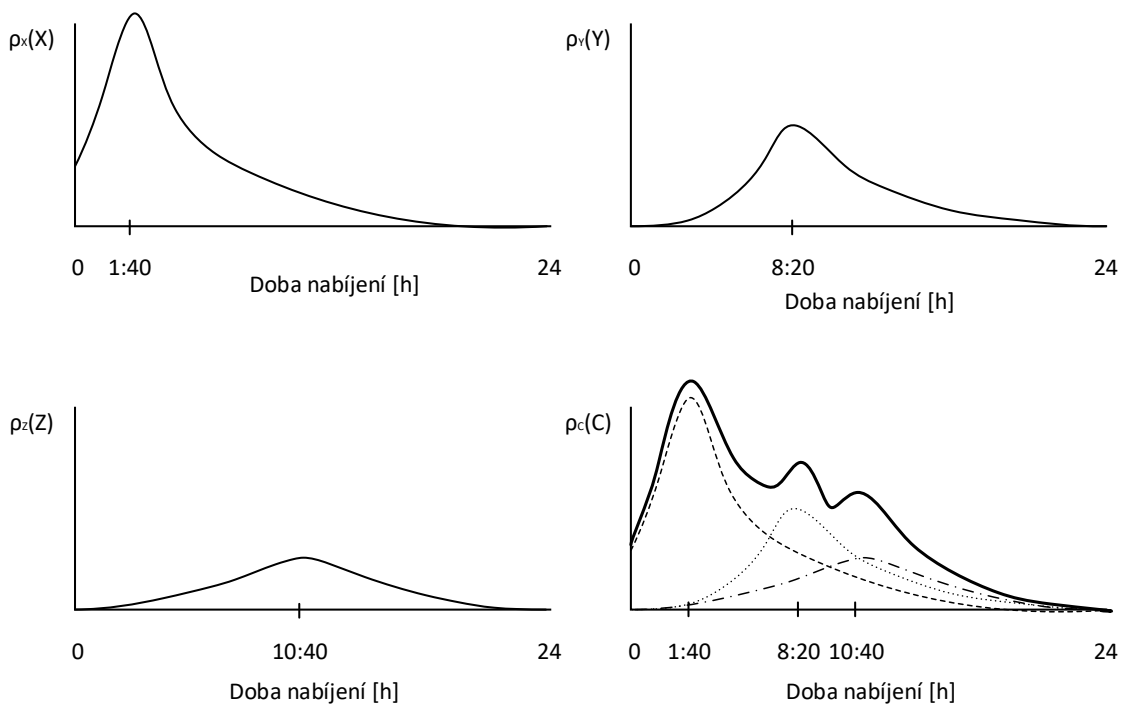
Opět platí, že neexistují empirická data pro ČR, neexistuje ani studie, která by se v prostředí ČR zabývala tímto problémem. Je však možné inspirovat se alespoň zahraničními případovými studii. Spoelstra [205, s. 28] ve své práci představuje histogram délky nabíjecí události a poskytuje bližší vysvětlení jeho zvláštního tvaru. Identifikuje 3 typy nabíjecího chování. První, nejčtenější typ jsou neplánované, relativně rychlé nabíjecí události, které mohou začít kdykoliv během dne a odehrávají se především na plně veřejných nabíjecích stanicích. Tento typ je na obr. 32 charakterizován prvním vrcholem zleva s délkou 1:40 hodin. Druhým typem jsou nabíjecí události na polo-veřejných nabíjecích stanicích, tzn. na stanicích pro specifikovaný typ zákazníků – nejčastěji zaměstnanců. Tento typ nabíjecích událostí bývá označován jako *workplace charging*, probíhá zpravidla během dne a je vysvětlen osmihodinovou pracovní dobou. Druhý typ je na obr. 32 charakterizován druhým vrcholem zleva s délkou 8:20 hodin. Třetím typem je podle Spoelstry noční nabíjení. Dokládá to statistikou, kde uvádí, že nabíjecí události s délkou kolem 10 hodin probíhají nejčastěji od časných večerních, do časných ranních hodin. Není jednoznačné, který typ nabíjecí stanice převažuje (veřejný / polo-veřejný). Třetí typ nabíjecího chování je na obr. 32 charakterizován třetím vrcholem

zleva s délkou 10:40 hodin. Spoelstrovo vysvětlení tedy obsahuje identifikaci tří rozdílných a jednoznačně rozlišitelných typů nabíjecího chování, přičemž tato chování konstituují výsledný tvar jeho empiricky zjištěného histogramu.



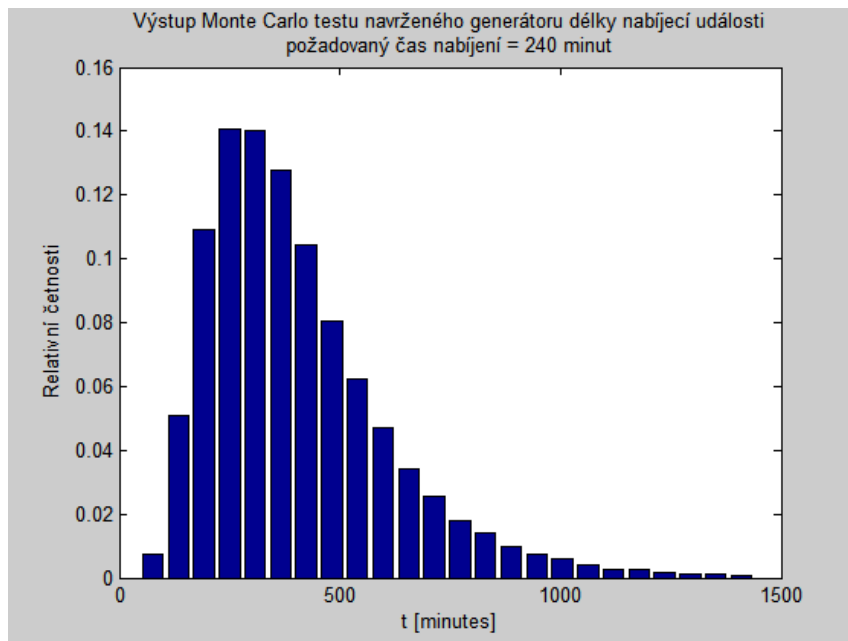
Obr. 32: Histogram délky nabíjecích událostí (transakcí), případová studie Nizozemsko 2014  
(Zdroj: [205])

Situaci je možné vysvětlit následující grafickou úvahou. Protože bohužel nejsou k dispozici původní data, ze kterých byl graf na obr. 32 vykreslen, nelze jednotlivé funkce hustoty pravděpodobnosti vypočítat přesně. Je možné si však vypomoct přibližným náčrtem. Uvažujme 3 statistické jevy  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  vázané postupně na tři popsané typy nabíjecího chování. Jde o jevy: délka neplánovaného nabíjení na veřejných stanicích ( $X$ ), délka plánovaného denního nabíjení na pracovišti ( $Y$ ), délka plánovaného nočního nabíjení ( $Z$ ). Potom funkce hustoty pravděpodobnosti těchto jevů  $\rho_X(X)$ ,  $\rho_Y(Y)$ ,  $\rho_Z(Z)$  mohou vypadat jako na obr. 33. Pokud jevy zkombinujeme do jediného složeného jevu  $C = X + Y + Z$  a provedeme vertikální součet jejich PDF funkcí, dostáváme funkci  $\rho_C(C)$ . Tím získáme rozdělení nápadně podobné Spoelstrově histogramu, čímž dokončujeme demonstraci důkazu jeho hypotézy, že sledovaná veličina: délka nabíjecí události, se skládá ze tří nezávislých typů nabíjecího chování.



Obr. 33: Předpokládané 3 funkce hustoty pravděpodobnosti  $\rho_X(X)$ ,  $\rho_Y(Y)$ ,  $\rho_Z(Z)$  a jejich kumulativní vertikální součet  $\rho_C(C)$  (vpravo dole)  
(Zdroj: Vlastní zpracování, podle [205])

Provedená analýza tedy odhaluje, že Spoelstrova data poskytují vodítko k návržení funkce hustoty pravděpodobnosti délky nabíjecí události. Té se dle Spoelstrova rozdělení typů nejvíce přibližuje první typ s funkcí  $\rho_X(X)$ , jelikož tento typ zřejmě představuje typické nepravidelné nabíjecí chování, kdy doba chování není ovlivněna denní dobou (noční nabíjení), nebo pracovní dobou (nabíjení na pracovišti). Toto nepravidelné nabíjecí chování lze naopak považovat závislé na stavu baterie (nejpravděpodobnější konec nabíjení lze očekávat v momentě, kdy stav baterie dosáhne 100 %), na čase (čím déle bude vozidlo u stanice stát, tím pravděpodobněji nastane odjezd) a na efektu způsobeného účinností nabíjecí zastávky (uživatel nebude chtít odjet okamžitě po příjezdu s minimem dobité kapacity, taková zastávka by pro něj byla zbytečná). Z uvedeného plyne, že vhodným statistickým rozdělením bude zřejmě nějaký typ nesymetrického rozdělení. Autor v tomto případě navrhuje upravené logaritmicko-normální rozdělení, jehož aplikace pro požadovanou délku nabíjení 4 hodiny je uvedena na obr. 34.



Obr. 34: výstup Monte Carlo simulace navrženého generátoru délky nabíjecí události  
(Zdroj: vlastní zpracování, MATLAB, `carDepartureGenerator.m`)

Generátor využívá logaritmicko-normální rozdělení s parametry  $\mu = 0$ ,  $\sigma = 0,5$  a transformuje jej tak, aby  $\mu = reqCT$ , kde  $reqCT$  je požadovaná délka nabíjení, tzn. množství času, které je potřeba k doplnění stavu baterie na 100 % při daném výkonu stanice a daném výchozím stavu baterie. Rovněž generátor zajišťuje, aby generovaná hodnota skutečné doby nabíjení spadala do intervalu  $\langle 0,24 \rangle$  hodin, tedy aby nepřesáhla délku jednoho dne. Pokud generátor vrátí hodnotu mimo tento interval, je hodnota ignorována a generátor je spuštěn znovu. Výstupem funkce `carDepartureGenerator` je tedy jediné číslo – délka nabíjecí události v rozmezí 0 až 24 hodin.

## 8.5 Model interakce vozidel a stanic

V předchozích kapitolách byly popsány funkce a datové struktury, které společně tvoří prvky většího systému, modelu interakce vozidel a nabíjecích stanic. Z hlediska typu lze o tomto modelu hovořit také jako o modelu hromadné obsluhy. Model i jeho prvky jsou sice vytvořeny v softwarovém prostředí MATLAB, oproti konvenčním simulačním modelům ale nemají podobu blokových schémat, jaké by vznikly v souvisejícím prostředí Simulink. Celý model záměrně postrádá tuto formu, a to ze dvou důvodů. Zaprvé, jeho hlavním účelem je jeho integrace do optimalizačního modelu. To znamená důraz na mnohonásobné pouštění s různými parametry. To klade vysoké nároky na výpočetní složitost. Jakákoliv probíhající grafická reprezentace, byť na pozadí, by zbytečně prodlužovala výpočetní čas každé iterace. Pro hlavní účel modelu zcela postačuje, že datové toky jsou reprezentovány iterativním přepočítáváním matic a datových polí. Zadruhé, při procesu optimalizace se v každé iteraci mění nastavení vnitřních parametrů modelu. Uživatel (optimalizační algoritmus) musí mít možnost rychle měnit vstupní parametry, a to i za situace, kdy každý prvek systému má nastavení parametrů jiné. Na příslušných místech budou tyto skutečnosti vysvětleny podrobněji, zde jen připomeňme,

že model, o kterém je zde řeč, není standardním modelem hromadné obsluhy s jedinou frontou určité délky, známým počtem obslužných míst a pravděpodobnostním rozdělením přicházejících požadavků. Každá stanice má zcela jiné parametry všech těchto aspektů, ze standardního pohledu je tedy každou stanicí třeba brát jako individuální model. Modelem, o kterém je v této kapitole řeč, se rozumí soubor stanic (tedy soubor standardních modelů hromadné obsluhy) a jejich individuálně definovaná interakce s množinou příjezdějících vozidel.

Model jako celek je reprezentován hlavní funkcí `queueModel()`. Tu lze rozdělit na tři části, v první části probíhá příprava vstupních dat, tzn. jsou volány modely časové a prostorové poptávky a model nabídky. Výstupy těchto modelů jsou zasazeny do aktuálně uvažovaného kontextu, což prakticky znamená, že je definován konkrétní časový rámec (například první kvartál roku 2017) a je načten aktuální stav nabíjecí infrastruktury, tedy aktuální databáze reálných veřejných nabíjecích stanic. V druhé části funkce `queueModel()` je iterativně volán samotný simulátor nabíjecích stanic zajišťující celý proces interakce vozidel a stanic, což je nosné téma kapitoly 8.5. Ve třetí části jsou vypočteny statistiky provedené simulace jakožto indikátory o kvalitě výsledku. Tyto statistiky následně využívá optimalizační algoritmus k určení hodnot kritérií optimality.

Formální deklarace funkce `queueModel()` je následující.

```
[unassignedDemand, dist, utilisation, denialRate, SAunion, XI, YI] =  
queueModel(stationSet, timeSpan, rmax)
```

Vstup funkce `stationSet` je množina stanic obsluhující příjezdějící vozidla. Funkce nerozlišuje, zda se jedná o reálné nebo potenciální stanice. Parametr `timeSpan` definuje časové období jako dvojici čísel, tedy např. `[2017.25, 2017.50]` znamená druhé čtvrtletí roku 2017. Parametr `rmax` pak definuje hodnotu poloměru SA.

Výstupy funkce jsou především statistiky simulace, viz kapitola 8.5.3, tj. `unassignedDemand`, `dist`, `utilisation`, `denialRate`, následně pak `mesh` celkové obslužené oblasti (`SAunion`) a její souřadnicové matice (`XI`, `YI`). Výstupy funkce `queueModel()` čtenáři zatím příliš neřeknou, dokud nebude objasněna její vnitřní struktura.

### 8.5.1 Volání a příprava vstupních dat

První část funkce `queueModel()` se skládá z několika komponent. Nejdříve je volána funkce `timeDemandModel()` reprezentující dlouhodobý trendový časový model poptávky popsany v kapitole 6.3.2. Tento model specifikuje celkový počet vozidel, které poptávají na celém území ČR veřejnou nabíjecí službu během jednoho dne v daném časovém období `timeSpan` (např. první kvartál roku 2017). Následuje volání funkce `prepTimeDemandModelData()`, která pracuje s krátkodobým časovým modelem poptávky a připravuje minutovou časovou řadu periodických výkyvů během sledovaného časového období `timeSpan`.

Výpočetně nejnáročnější částí `queueModel()` je volání funkce `assignDemand()` jejíž cílem je přiřazení daného počtu nabíjení poptávajících vozidel na příslušná místa ČR a příslušnost těchto míst k nejbližší veřejné nabíjecí stanici. To znamená, že celková poptávka se pomocí funkce `demand2meshgrid()` rozprostře po území ČR tak, jak je definováno v prostorovém modelu poptávky v kapitole 6.3.1. Pomocí funkce `distDiminish()` se vypočte geodetická vzdálenost každého bodu ke všem nabíjecím stanicím a pro každý bod se vybere stanice s nejnižší vzdáleností. Tato stanice bude obsluhovat daný bod stejně jako ostatní body, pro které platí, že vzdálenost mezi nimi a stanicí, která je obsluhuje, je nejnižší.

Uveďme vztah přiřazení bodů a stanic přesněji. Necht'  $X$  je množina všech uvažovaných bodů. Ve skutečnosti by se jednalo o všechny body na území ČR, v modelu, se kterým pracujeme, jde o středové souřadnice čtvercových buněk o hraně přibližně 200 metrů pokrývající celé území ČR. Množina  $S$  pak necht' je množinou všech stanic. Funkce `distDiminish()` nám umožňuje stanovit geodetickou vzdálenost dvou bodů  $x \in X$  a  $s \in S$ . Vytvořme matici vzdáleností pro  $X \times S$  a hledejme nejnižší hodnotu v každém řádku, tedy pro každý bod. Sloupcový index buňky s nejnižší hodnotou v řádku bude odpovídat přiřazení bodu ke stanici. Jestliže bude řádek obsahovat více než jednu minimální hodnotu, vyberme libovolnou z nich. Tímto způsobem postupujeme pro všechny dvojice  $X \times S$  a získáme zobrazení  $\forall x: M \subseteq X \times S$ , kdy každému bodu  $x$  přísluší právě jedna stanice.

Pro každou stanici, které je přiřazen alespoň jeden bod, je stanovena poptávka. Tento proces bere v potaz prostorové rozdělení poptávky získané z funkce `demand2meshgrid()` a service area každé stanice. Následuje stanovení celkové uspokojené poptávky (zde bychom snad měli spíše mluvit o uspokojitelné poptávce, jelikož v tomto momentě prozatím není jisté, že všechna vozidla budou u stanice obsloužena), což je poptávka pocházející z veřejně obslužených oblastí. Připomeňme, že veřejně obslužené oblasti jsou ty, které spadají do SA některé z veřejných nabíjecích stanic. Poptávka mimo tyto oblasti je označena jako neuspokojená (resp. neuspokojitelná).

Poslední, co musí funkce `assignDemand()` ještě vrátit, je speciální metrika ve formě meshe znázorňující tzv. poptávkově-váženou vzdálenost `weightedDistance`. Jde o speciálně navržený ukazatel, jehož cílem je měřit vhodnost prostorového rozložení nabíjecích stanic v kontextu prostorového rozložení poptávky. Motivace za konstrukcí tohoto ukazatele je následující. Pokud známe rozsah veřejně obsluhované oblasti, pak to ještě neznamená, že víme, jak kvalitně jsou v této oblasti stanice rozprostřeny. Podobně to platí pro neobsluhované oblasti. To, že určité dvě oblasti považujeme za neobsluhované ještě neznamená, že je lze chápat jako rovnocenné. Například jeden bod může být velmi vzdálen od nejbližší stanice a druhý bod může být těsně za hranicí obsluhované oblasti. Zřejmě platí, že odlehlejší bod je z hlediska prostorové optimality rozmístění stanic chápán hůře než bod přilehlejší. Navíc, pro dva různé body stejně vzdálené od nejbližší stanice může platit, že jeden vykazuje z prostorového modelu poptávky vysoké hodnoty

poptávky a druhý bod hodnoty nízké. Jistě platí, že bod s vyšší poptávkou by měl být v úvahách o optimalitě rozmístění nabíjecích stanic preferován před bodem s nižší poptávkou, nehledě na to, zda jde o body veřejně obsluhované, či nikoliv.

$$\text{weightedDistance} = \sum_{i=1}^n \text{distDiminish}(m_i) \cdot \text{Demand}_i \quad \text{Rov. 30}$$

Uvedené vlastnosti dokáže navržená metrika zachytit. Její symbolické znázornění představuje rov. 30 a lze vidět, že jde o pokračování úvah o příslušnosti bodu k nabíjecí stanici. Proměnná  $m_i \in M$  je dvojicí hodnot ( $i$  – tý bod, nejbližší stanice) získanou ze zobrazení  $M$ , funkce  $\text{distDiminish}()$  je již představenou funkcí geodetické vzdálenosti a proměnná  $\text{Demand}_i$  je hodnotou poptávky daného bodu  $i$ . Metrika  $\text{weightedDistance}$  tedy stanovuje hodnotu poptávkově vážené vzdálenosti od nejbližší nabíjecí stanice pro každý bod sledovaného území a tyto hodnoty sčítá pro všechny body. Protože v celém modelu se předpokládá fixní hustota meshe, existuje konečný počet těchto vážených vzdáleností. Pokud je tedy do existující sítě stanic přidána stanice nová, většinu bodů meshe to neovlivní. Ovlivní to však ty body, pro které bude platit, že nová stanice je nově jejich nejbližší veřejnou nabíjecí stanicí. Pro tyto body se metrika  $\text{weightedDistance}$  přepočítá. Jelikož se prostorové rozložení poptávky považuje za konstantní (z kapitoly 6.3.1) a ostatní body jsou nedotčeny, je hodnota metriky podle rov. 30 pro tyto ovlivněné body snížena, což způsobí snížení celkového součtu, tedy snížení hodnoty metriky. Platí, že čím vzdálenější body a čím poptávanější body jsou novou stanicí obsluhováni, tím více se hodnota metriky  $\text{weightedDistance}$  sníží. Tato vlastnost dělá z metriky vhodného kandidáta pro optimalizační účely při přidávání nových stanic.

## 8.5.2 Simulátor nabíjecích událostí

Nyní se vraťme o úroveň výše, zpět k hlavní funkci `queueModel()`. Jakmile jsou načteny výstupy krátkodobého a dlouhodobého časového modelu poptávky, výstupy prostorového modelu poptávky a argumentem funkce je předána množina stanic představující aktuální nabídku, lze přejít k jejich interakci. Ta se zpracovává iterativně pro jednotlivé dny sledovaného období `timespan`.

V této části jsou použity navržené generátory diskretních událostí popsané v samostatných kapitolách 8.1 až 8.4. Nejprve je aplikován generátor příjezdů `generateArrivals()` (kap. 8.2), jehož cílem je vytvořit diskretní události příjezdů vozidel k příslušným nabíjecím stanicím. Poté jsou pomocí funkce `SOCgenerator()` (kap. 8.3) vygenerovány stavy baterií jednotlivých vozidel v momentě příjezdu ke stanici, tzn. maximální kapacita baterie a aktuální kapacita baterie. Následuje iterativní volání funkce zabezpečující interakci mezi jednou nabíjecí stanicí a k ní přijíždějícími vozidly, to celé během jednoho dne. Následuje funkce, jež je hlavní komponentou simulátoru příjezdů a odjíždění vozidel k nabíjecím stanicím, odkud vzniklo její pojmenování: `stationSimulator()`.

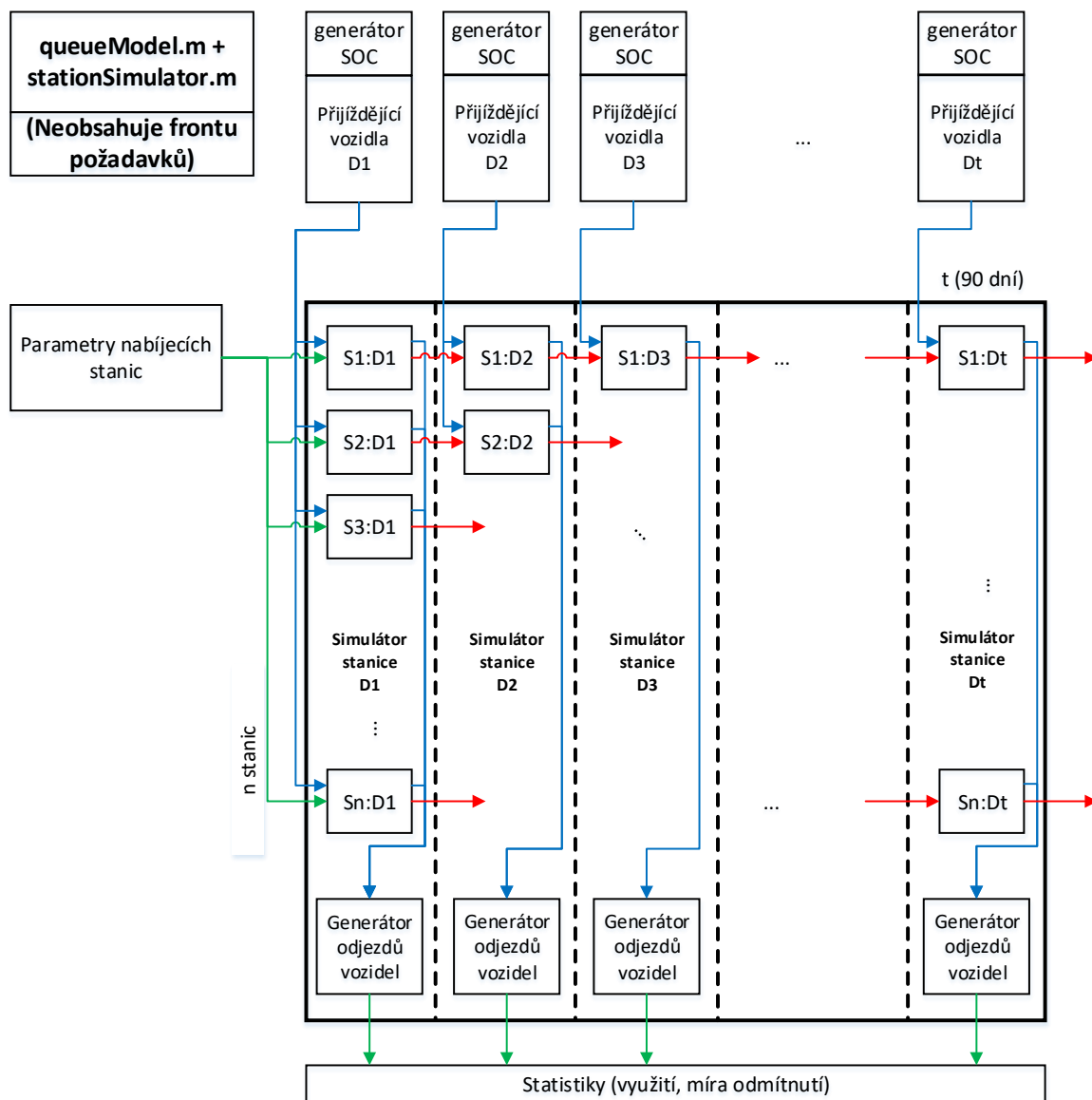


```
[CEcurr, CCarryOn, deniedVehicles] = stationSimulator(vehInc,  
stParams, stStatus, batStatus)
```

Funkce `stationSimulator()` načítá matici binárních hodnot `stStatus`, která obsahuje stavy jednotlivých konektorů stanice během dne a aktualizuje tyto stavy přiřazováním vozidel přijíždějících v časech `vehInc` s kapacitou baterie na úrovni `batStatus`. Zároveň počítá, jak dlouho přijíždějící vozidlo u stanice zůstane, k čemuž používá výstupu generátoru pobytu (kap. 8.4), který očekává jako vstup požadovaný čas nabíjení. Ten je vypočten jako čas potřebný k nabití baterie na úrovni `batStatus` nabíjecím výkonem `stParams`. Funkce `stationSimulator()` také zajišťuje, aby vozidla využívala u stanice vždy nejrychlejší dostupné připojení. Nabíjecí přípojky stanice jsou seřazeny podle výkonu a pro připojení nového vozidla se vybere přípojka s nevyšším výkonem, která v čase připojení není obsazená. Jestliže jsou v čase příjezdu vozidla obsazeny všechny přípojky, vozidlo se odmítne. Model záměrně nepracuje s frontou, předpokládá, že vozidla mají nulovou čekací dobu. Odůvodnění lze snadno vydedukovat, případně lze nahlédnout do kapitoly 7.3 na koncept TTSF.

Výstupem funkce `stationSimulator()` je aktualizovaný stav stanice pro aktuální den `CEcurr` (průběh nabíjecích událostí v konkrétním dni), aktualizovaný stav pro následující den `CCarryOn` (průběh nabíjecích událostí, které svou délkou zasahují do následující dne) a statistika odmítnutých vozidel `deniedVehicles` (vozidla, která byla stanicí odmítnuta, jelikož v době jejich příjezdu neměla stanice žádné volné konektory).

Diagram na obr. 35 znázorňuje zde popisovanou druhou část funkce `queueModel()`. Obrázek vizualizuje interakci přijíždějících a odjíždějících vozidel u jednotlivých stanic během daného časového období, přičemž se se zaměřuje zejména na propojení generátorů diskretních událostí popsaných v kapitolách 8.2 až 8.4 s řídicí funkcí `stationSimulator()`.



Obr. 35: Grafické znázornění modelu interakce vozidel a stanic.  
 (Zdroj: vlastní zpracování, MS Visio, dle queueModel.m a zejm.  
 stationSimulator.m)

### 8.5.3 Statistika simulace

Aby bylo možné zhodnotit, jak určitý běh algoritmu dopadl, tedy smysluplně interpretovat, co se vlastně událo a jak se to lišilo od jiných běhů algoritmu s jiným nastavením, je nutné vytvořit ukazatele a sledovat jejich vývoj pro jednotlivé stanice, dny, iterativní spuštění apod. K tomu je určena poslední část funkce `queueModel()` pracující se statistikami, jež vrací funkce `stationSimulator()`. V rámci ní se sleduje, jak probíhalo přijíždění vozidel k jednotlivým stanicím během všech  $t$  dnů a jaká u stanic nastávala situace. Na jedné straně se mohlo stát, že stanice byla přetížená, tzn. vozidla přijela a nebyl dostupný žádný nabíjecí konektor, což způsobilo, že byla stanice tzv. odmítnuta. Na druhé straně se mohlo stát, že ke stanici přijíždělo množství vozidel relativně malé vůči počtu konektorů, což způsobilo, že mnoho konektorů se buď nikdy

nepoužilo, nebo jen velmi výjimečně. Případně se mohlo stávat, že po většinu času byla stanice prázdná, ale v dobách dopravních špiček její kapacita nestačila.

Všechny tyto statistiky jsou zachyceny ještě uvnitř funkce `stationSimulator()` a jsou vráceny funkcí `queueModel()` jako vektory binárních hodnot pro každou minutu, stanici a každý den. To znamená, že máme statistiky v nejvyšším možném detailu, které je potřeba agregovat a smysluplně prezentovat. K tomu slouží v závěru funkce `queueModel()` funkce `infrastructureStats()` zpracovávající tyto detailní binární vstupy do ukazatelů využití stanice (`utilisation`) a míry odmítnutí vozidel (`denialRate`).

```
[utilisation, denialRate] = infrastructureStats(arrNum,  
stStatus, deniedVehs)
```

Statistika využití stanice se dá interpretovat ve třech různých rozměrech: 1) jako matice pojednávající o využití jednotlivých stanic v jednotlivých dnech, 2) jako vektor pojednávající o celkovém využití všech stanic během jednoho dne, nebo jako vektor pojednávající o využití jedné stanice během všech dnů, 3) jako skalární hodnota udávající jediným číslem celkovou vytíženost stanic. Statistiku odmítnutých vozidel lze použít analogicky: 1) Sledovat odmítnutá vozidla během jednotlivých dnů u jednotlivých stanic, 2) sledovat všechna odmítnutí během jediného dne, nebo u všech stanic, 3) případně stanovit celkový počet vozidel u všech stanic za všechny dny.

Jelikož lze předpokládat, že optimalizační model bude nejnadhěji pracovat se skalárními hodnotami ukazatelů, je v případě obou ukazatelů upřednostňován třetí formát, ten nejvíce agregovaný, skalární. Na rozdíl od ukazatele vytíženost není ukazatel odmítnutých vozidel definován jako procentuální podíl, ale jako absolutní hodnota. Je vhodné jejich sjednocení, a proto v závěru funkce `infrastructureStats()` je proveden převod druhého ukazatele na míru odmítnutí jakožto podíl počtu odmítnutých vozidel ke všem přijíždějícím.

## 9 Optimalizační model

Modely poptávky (kap. 6), nabídky (kap. 7) a jejich tržní interakce (kap. 8) dohromady tvoří jediný simulační model. Samotný tento model ovšem nedokáže nahlédnout sám na sebe a v nějakém ohledu sám sebe optimalizovat. K tomu slouží optimalizační model představený v této kapitole. Ten bere výše představený simulační celek a formuluje z něj optimalizační problém a konstruuje jemu odpovídající optimalizační model.

### 9.1 Kritéria optimalizace

Než může být započata práce na optimalizačním modelu, je nutné pevně a jasně stanovit kritéria optimalizace. Je nutné si vyjasnit, z jakého důvodu se optimalizuje, co má být optimalizací splněno a co nesmí být porušeno. Tímto způsobem se plynule formuluje účelová funkce a omezující podmínky, s nimiž bude optimalizační algoritmus následně pracovat. Tato kapitola polemizuje obecně o kritériích optimalizace, záměrně v úvodu nerozlišuje účelovou funkci a omezení, nechává si prostor, aby optimalizační model mohl v závěru kapitoly nabýt té nejvhodnější podoby.

#### 9.1.1 Kritérium spojitosti SA a pokrytí ČR

Sledování veřejné diskuze na téma elektromobility v ČR i ve světě po letech konečně přineslo své plody. Autor získal přehled o problémech, které potenciálního zájemce o elektromobil trápí, dozvěděl se o každodenních strastech uživatelů elektromobilů a získal řadu podnětů na zlepšení. Zdrojem mu byly zejména žurnalistické články zájmových a technologických webů, sdružení uživatelů PEV a nadšenců do elektromobility a kritické komentáře jejich odpůrců. V této diskuzi se už roky drží dvě kritické výtky na elektromobilitu a zdá se, že trápí její odpůrce i příznivce podobnou měrou. Jde o omezenou dojezdovou vzdálenost vozidel a nedostatek nabíjecí infrastruktury. To vše s odkazem na provedenou rešerši z kap. 2.

Problém omezené dojezdové vzdálenosti je otázkou dostupné technologie a ochoty zákazníka platit za navýšení dojezdové vzdálenosti. Je nepochybně jasné, že při všech ostatních parametrech stejných bude zákazník preferovat vyšší dojezdovou vzdálenost před nižší. To ale neznamená, že bude ochoten platit desítky procent ceny vozu navíc za navýšení kapacity baterií. Technologický aspekt dojezdové vzdálenosti je ústředním motivem většiny světových producentů elektromobilů a ti se snaží přijít s různými způsoby jeho navýšení při zachování úrovně nákladů. Požadavek nové technologie vyžaduje nemalé investice do výzkumu a výsledek je nejistý. O významné navýšení kapacity baterií se snaží vědci aktivně už desítky let, nutno dodat, že s velmi pozvolným vývojem. Celá společnost, postupně stále více mobilní a závislá na bateriích, očekává technologický průlom, který nepřichází. Je možné, že takový průlom nemusí vůbec nastat ani v horizontu dlouhých desítek let. Současným trendem je proto snižování nákladů, aby alespoň daná kapacita baterie byla škálovatelná za rozumnou cenu.

Psychologický aspekt dojezdové vzdálenosti, dle autora výrazně podstatnější, je předmětem pomalé změny. Zájemci o elektromobilitu se přesto občas odhodlají

zariskovat a pořídit si svůj první elektromobil s dojezdovou vzdáleností nižší než je dojezdová vzdálenost jejich původního ICEV. Ti pak zřejmě poznají, že mít možnost dojet na jedno nabití 300 km, namísto původních 800 km, je dostatečné, jelikož jejich denní cestování málokdy přesáhne 100 km. Požadavek vyšší dojezdové vzdálenosti je sice v principu oprávněný, ale v praxi nevyužívaný. Zákazník tedy požaduje stejnou dojezdovou vzdálenost nikoliv proto, že by ji potřeboval, ale proto, aby nemusel měnit své zvyky. Ty ale při pořízení elektromobilu stejně změnit musí, jelikož dynamika a možnosti nabíjení se liší od dynamiky a možností čerpání pohonných hmot. Tím se taková diskuze nad problematikou omezené dojezdové vzdálenosti stává argumentačně prázdnou, jelikož takto argumentující zákazník jednoduše odmítá elektromobil v jeho konceptu, odmítá si pořídit výrobek, který by ho nutil měnit své chování. To je naprosto v pořádku, není cílem výrobců elektromobilů předstírat, že se jedná o tentýž výrobek jako konvenční automobil. Není důvod nutit zákazníka ke změně. Podobná veřejná diskuze ostatně probíhala, byť s rapidnějším dopadem, o několik roků dříve při nástupu chytrých telefonů.

Problém nedostatku nabíjecí infrastruktury implicitně hovoří o nedostatku veřejně přístupné nabíjecí infrastruktury. Je zřejmé, že proponenti této námitky mají obavu z toho, že oni sami nemohou, či by nemohli, pokud o pořízení PEV teprve uvažují, nabít své vozidlo všude tam, kam se vydají. Řešením této námitky je navýšení počtu nabíjecích stanic, ovšem velmi záleží, na kterých místech. Je zřejmé, že znásobení počtu nabíjecích konektorů na stávajících stanicích tento problém neřeší. Ve skutečnosti by toto opatření ani nijak nepřispělo k jeho řešení. Tato námitka odráží potřebu vyšší hustoty sítě nabíjecích stanic a také větší pokrytí ve smyslu rozlohy území, které je touto sítí pokryto. Odpovědět na takový požadavek lze velmi příhodně konceptem *service area*. SA vymezuje oblast pokrytou nabíjecí službou. Její rozsah je nastaven tak, aby všechna vozidla byla schopna se pohybovat v této oblasti bez toho, aniž by hrozilo úplné vybití baterií. Pochopitelně se zde předpokládá racionální uživatel, který dbá na včasné nabíjení. V kapitole 4.4.3 pojednávající o SA jsou uvedena tři tvrzení vymezující různé pojmy. Druhé tvrzení hovoří o množině veřejně dostupných uzlů, což je oblast pokrytí nabíjecími stanicemi, která je souvislá a v rámci které se dá volně pohybovat analogicky jako v případě jedné stanice a její SA. Rozšíření této oblasti po celém území ČR je odpovědí na onu námitku. Pokud budou všechna místa v ČR veřejně dostupná, tzn. obslužená alespoň jednou veřejně dostupnou nabíjecí stanicí, pak bude vyřešen problém nedostatečného pokrytí z hlediska rozlohy nabíjecí infrastruktury. Odtud plyne, že prvním kritériem optimalizace by mělo být kritérium pokrytí celého území ČR sítí veřejně dostupných nabíjecích stanic.

### **9.1.2 Kritérium vytíženosti stanic**

Samotné kritérium pokrytí, potažmo zákaznický požadavek rozsahu služby, ovšem nezahrnuje druhý pohled, totiž stanovisko provozovatelů stanic. Ti mají zřejmě také co říct k podobě nabíjecí infrastruktury, nicméně cíle jejich zájmu budou odlišné. Zde se nabízí navrhnout jejich ekonomické stanovisko k věci, tedy započítat úvahy o nákladech a výnosech investičního záměru. V tomto momentě ještě zadržme a uvedme problém do

širší perspektivy. Při diskuzi nad sítí nabíjecích stanic se o ní vždy uvažovalo jako o veřejně dostupné. Toto označení ovšem nijak neimplikuje motivy budování takové sítě. Je pravda, že elektromobily jsou na nabíjecí infrastrukturu kriticky závislé. Kdo další kromě majitelů elektromobilů má ale zájem na jejím vybudování? Jednou skupinou mohou být výrobci elektromobilů, kteří těží z nabíjecí infrastruktury zprostředkovaně přes zvýšený zájem zákazníka o elektromobil. Potenciální uživatel se rozhoduje o koupi a zvažuje klady a zápory přechodu z ICEV na PEV. V potaz bezesporu bere i příležitosti nabíjení. Vyšší hustota a rozloha sítě mu poskytne vyšší komfort. Touto cestou se někteří výrobci PEV vydali od samého začátku. Zmínit lze zejména Tesla Motors [212], jejichž síť rychlých nabíjecích stanic je celosvětově známá.

Další skupinou mající zájem o stav nabíjecí infrastruktury jsou podnikatelé, resp. investoři se záměrem poskytovat tuto službu za účelem dosažení zisku. Takové subjekty by ve zdravé tržní ekonomice měly tvořit většinu poskytované služby. Fenomén elektromobility je ovšem zatížen notnou dávkou státních zásahů, zejména pak přímými nebo nepřímými (daňovými, legislativními) subvencemi. To může na jednu stranu podnikatele motivovat ke vstupu na trh s nabíjecí službou, na druhou stranu to zvyšuje riziko takové investice, jelikož výše subvencí se může zcela nečekaně a rapidně měnit, což znemožňuje smysluplně a dlouhodobě kalkulovat investiční příležitost. I přesto existují zejména v zahraničí podniky s tímto motivem zájmu o nabíjecí infrastrukturu [213] [214] [215] a další.

Další skupinou je pochopitelně veřejná sféra, čímž se má na mysli zejména stát, popř. uskupení států typu EU, jejich organizační složky ve formě ministerstev, dále pak municipality a veřejné instituce lokální působnosti, ale i nejrůznější zájmové organizace financované z veřejných rozpočtů (neziskové organizace, spolky apod.). Veřejná sféra je aktuálně zřejmě nejhlasitějším propagátorem elektromobility, i když její zapojení je spíše pasivní. Určuje politické záměry, legislativní rámce, vypisuje finanční pobídky a agituje za elektromobilitu u široké veřejnosti. Nutno dodat, že tuto činnost neprovádí celé politické spektrum, nicméně jde o tu část státní správy, která se v EU i v ČR v minulých přibližně 10 letech těšila velké podpoře veřejnosti. Tak vznikly programy a plány na evropské úrovni [32], ze kterých vycházejí plány vlád jednotlivých států [31].

Cílem organizací veřejné správy v kontextu elektromobility je podpořit zájem veřejnosti, přimět koncového uživatele o přemýšlení o alternativách k ICEV a eventuálně podpořit koupi elektromobilu jakožto alternativy k ICEV. Koncoví uživatelé nemusí být pouze soukromé osoby. Firmy mohou v PEV vidět alternativu ve chvíli, kdy celkové náklady na jejich pořízení a provoz budou stejné nebo nižší než u ICEV. Celkovými náklady se mají na mysli veškeré náklady spolu se subvencemi a poplatky na pořízení a provoz PEV vůči pořízení a provozu ICEV. Spotřební daň na pohonné hmoty, emisní daně, povinné ručení a další, to vše je pro koncového uživatele stejně platná negativní pobídka spojená s provozem ICEV, jako je daňové zvýhodnění nebo vyhrazené parkování pozitivní pobídkou spojenou s provozem PEV. Finanční zvýhodnění je však pouze jedním faktorem v rozhodování koncového uživatele. Pokud nebude existovat způsob, jak elektromobil smysluplně využívat, například proto, že nebude existovat dostatečná

nabíjecí infrastruktura, pak si ho uživatel nebude ochoten pořídit ani za zlomek ceny ICEV. Z tohoto důvodu je veřejná správa zainteresovaná v budování nabíjecí infrastruktury stejnou měrou, jako je zainteresovaná ve finančních pobídkách. Veřejné finanční pobídky mají povahu transferových plateb, jejich smysluplnost se neodvíjí od ekonomických ukazatelů ziskovosti. Analogicky, motivace veřejné správy k budování nabíjecí infrastruktury není motivována ekonomickou ziskovostí. Kritériem úspěchu pak zřejmě bude jiný ukazatel, pravděpodobně vztahující se k nákladům a jejich účelnému využití.

Nyní je třeba syntetizovat stanoviska uvedených tří zájmových skupin a navrhnout kritérium, které bude pro všechny společné. Tím se zdá být kritérium vytíženosti stanice. Pro výrobce elektromobilů bude platit, že čím méně stanic postačí k obsluze jejich prodaných vozidel, tím lépe. Komerční poskytovatel chce rovněž vytížit své stanice na maximum, aby dosáhl maximálních tržeb a tím pokryl co nejdříve náklady na pořízení stanic a rychleji dosáhl bodu zvratu své investice. Veřejnou správu bude zajímat užitečnost vynaložených nákladů na nabíjecí infrastrukturu. Pokud bude infrastruktura vytížená málo nebo vůbec, je to signál, že s investicí z veřejného rozpočtu bylo možné ještě nějakou dobu počkat, případně že investice byla zbytečná. Kritérium vytíženosti stanic je tak druhým kritériem optimalizace rozmístění veřejné nabíjecí infrastruktury.

### **9.1.3 Kritérium ekonomické návratnosti investice**

Může se stát, že i maximálně vytížená stanice nedosáhne ziskovosti ani za celou dobu své životnosti, nebo ziskovosti dosáhne, avšak z hlediska investora velmi malé a velmi pozdě. Má proto smysl ptát se, zejména v ekonomicky zaměřené studii, nakolik je smysluplné zřízení takové stanice. Je zřejmé, že ekonomická návratnost investice je subjektivně vnímána osobou investora. Objektivizovat takové kritérium vyžaduje deklaraci univerzální ekonomické návratnosti platné pro všechny investory. K tomuto účelu slouží tržní úrokové míry, běžně využívané jako referenční hodnota při posuzování jakosti investice. Ty se však mění s hospodářským cyklem, rizikovostí daného případu a se situací ve světové a regionální ekonomice. Zasadíme-li problematiku úrokových měr do časového rámce, v němž docházelo a dochází k rozvoji elektromobility, pak můžeme konstatovat, že od roku 2009, kdy ještě elektromobily existovaly skutečně jen mezi nadšenci a široká veřejnost se o ně příliš nezajímala, přes roky 2011-2012, kdy dochází k nástupu rapidně rostoucího trendu, až po současnost, kdy se k elektromobilitě hlásí většina hlavních hráčů na automobilovém trhu, byly úrokové sazby extrémně nízké. V současnosti sice dochází k jejich zvýšení, nicméně pilotní nabíjecí infrastruktura byla ve vyspělých zemích již vybudována. Počáteční nejistota, zda nastupující trend vůbec přetrvá a o nabíjecí stanice bude zájem, je pryč a současná situace stále ještě relativně levných peněz nahrává dalším rozšířením. Ziskovost takového investičního záměru je pak otázkou očekávání rozvoje trhu s elektromobily v dané zemi, kapacity současné nabíjecí infrastruktury a její vytíženosti, a vyspělosti technologie nabíjecích stanic, resp. jejich ceny a výkonu.

Problém s výpočtem ekonomické návratnosti je klasickým problémem predikce. Výpočet pro konkrétní stanici je o to těžší, že by bylo nutné stanovit lokální podmínky místa, kde stanice bude stát, zejména pak množství vozidel, které obslouží. Je obtížné odhadnout celkový počet vozidel majících zájem o nabíjení v nějakém budoucím časovém okně. V případě jedné stanice by bylo nutné navíc stanovit, jaký podíl z celkového počtu vozidel bude chtít doplňovat svou kapacitu baterií právě na tuto stanici. Obtížemi spojenými s determinací této kvantity ovšem problém zdaleka nekončí, naopak. Bylo by nutné dopředu říct, jak často tato vozidla budou na stanici přijíždět. To, že chce denně na stanici nabít své vozidlo 6 uživatelů ještě neznamená, že budou přijíždět v pravidelných čtyřhodinových intervalech. Pravděpodobně tomu bude naopak, tedy vozidla budou přijíždět v dávkách, což způsobí, že pro všechny nebude volné místo. Bylo by tedy nutné předpovědět, jak dlouho budou chtít uživatelé čekat. Nabíjení trvá poměrně dlouhou dobu. Je pravděpodobné, obzvláště ve veřejných nabíjecích stanicích v obcích, že majitel vozidla nebude čekat na plné nabití na místě, ale vzdálí se. V takovém případě by bylo nutné rovněž odhadnout, jak dlouho bude stanici blokovat, i když jeho vozidlo už bude plně nabité. A tato skutečnost by byla významně specifická pro konkrétní lokalitu, v níž stanice stojí. Bylo by nutné stanovit, jakým způsobem budou zákazníci reagovat na změny ceny, jak si bude stát stanice v konkurenčním boji a jakým způsobem bude zpoplatněno využívání stanice (účtování za jednorázově čerpanou energii, účtování za jednorázovou blokaci nabíjecího místa, nějaká forma členství formou předplatného). Apriorní posouzení ziskovosti individuální stanice se tak stává nesmírně komplikovanou záležitostí. Stanovení takovéto veličiny s rozumnou dávkou přesnosti je extrémně informačně náročné a prakticky bude možné zřejmě až v době, kdy se trh s elektromobily stabilizuje a budou k dispozici informace o lokálních nabíjecích událostech uživatelů elektromobilů.

Alternativně by šlo uvažovat stanovení ziskovosti pro nabíjecí infrastrukturu jako celek. Odpadlo by tak definování lokálně specifických informací, což by snížilo informační náročnost takového výpočtu. Nezbytné by bylo stanovit celkové náklady na nabíjecí infrastrukturu, které ovšem může v agregované podobě odhadnout některá veřejná instituce. Zjištění tržeb by bylo komplikovanější a šlo by buď rovněž nepřímou přes veřejnou instituci, případně by se tržby daly odhadnout na základně zkušeností některé firmy podnikající v daném oboru, která by disponovala informacemi o tržní situaci. Výsledkem takovéto studie by pak bylo konstatování, jaká je průměrná doba návratnosti investice do infrastruktury, přičemž by však existovaly podstatné rozdíly mezi jednotlivými stanicemi. Investor by tak nejspíše musel provozovat celou síť nabíjecích stanic, aby nízké tržby na špatně umístěných a dimenzovaných stanicích byly kompenzovány dobře umístěnými stanicemi, případně by musel dynamicky škálovat infrastrukturu podle potřeby.

Rozdíl mezi stanovením využitosti a ziskovosti stanice je dvojnásobný. Stanovení ziskovosti je informačně mnohem náročnější než stanovení využitosti, jelikož při výpočtu ziskovosti je nutné stanovit využitost a k ní ještě množství dalších ukazatelů. Deklarace ziskovosti však s sebou nese nádech jistého závazku, závazku určité výše zisku za stanovený počet



let. To je intuitivně silnější tvrzení než deklarace vytíženosti, obzvláště pro subjekt s ekonomickými motivy. Vytíženost je neutrální technický termín, který má stejnou vypovídací schopnost pro všechny zainteresované skupiny, tj. výrobce vozidel, soukromé investory, veřejnou správu, či dokonce koncového zákazníka, který díky ní může odhadnout, zda na konkrétní stanici může očekávat volné místo. V každém případě uvažujeme prozatím kritérium ziskovosti investice jako třetí optimalizační kritérium.

#### **9.1.4 Kritérium vytíženosti přenosové sítě**

Literatura na téma optimalizace nabíjecí infrastruktury se nejčastěji zabývá problémem z jiného než ekonomického pohledu. Autoři takových prací jsou často experty v oblasti energetiky, přičemž jejich hlavním zájmem je vliv rozvoje elektromobility na stabilitu elektrické přenosové sítě, případně vztah mezi generováním a spotřebou elektrické energie. Z toho důvodu je vhodné stručně se vyjádřit k nabízejícímu se kritériu, které by se dalo zjednodušeně klasifikovat jako vytíženost přenosové sítě. Toto kritérium, byť má ekonomické dopady, vyžaduje zcela odlišný pohled na věc. Odborná literatura, v níž se objevují studie zabývající se tímto problémem, není literaturou ekonomickou. Zabývat se problémem vytíženosti přenosové sítě vyžaduje hluboké expertní znalosti z oborů mimo kompetence autora této práce. I když by tedy kritérium vytíženosti přenosové sítě bylo vhodným kandidátem na optimalizační kritérium, z důvodu nedostatku expertízy v oblasti silnoproudé elektrotechniky a energetiky se v této práci nemůže objevit. Při reálné aplikaci prezentovaného modelu je však možnost na tomto místě kritérium vytíženosti přenosové sítě přidat, pokud bude jeho problematika zpracována kompetentní osobou. Z důvodu formátu disertační práce, které je chápána jako autorovo samostatné dílo, však nelze takovou osobu ke zpracování přizvat.

#### **9.1.5 Výběr kritéria optimalizace**

V kapitolách výše jsou představena celkem čtyři kritéria optimalizace. Cílem těchto kapitol bylo jednotlivá kritéria samostatně prozkoumat a zhodnotit, zda s nimi lze pracovat v optimalizačním modelu. Z uvedené polemiky vyplývá, že čtvrté kritérium nelze uvažovat pro nedostatek expertních znalostí. Zbývající tři kritéria už do optimalizačního modelu zakomponována být mohou.

Přijetí všech tří kritérií jako rovnocenných by vedlo na vícekritériální optimalizační model, kde by pravděpodobně figurovala polemika nad vzájemnou substitucí těchto kritérií na hranici Paretovy množiny. Takový výsledek je sice validním řešením, avšak uživateli neodpovídá jednoznačně, spíše mu poskytuje mantinely, ve kterých se má pohybovat. Navíc tím, že optimalizační model je koncipován jako iterační, by nejednoznačnost výsledku jednotlivých iterací způsobila, že každé řešení jedné iterace by bylo výchozím bodem iterace následující. To znamená, že každé řešení by se iterativně větvilo a počet takových větví by exponenciálně rostl. Tím by docházelo ještě k nepřehlednější situaci, kdy množství různých výsledků by zcela znemožnilo jejich smysluplnou interpretaci, navíc z praktického pohledu by takové množství optimalizačních větví bylo výpočetně neúnosné.

Řešením je použití jednokriteriální optimalizace, což klade požadavek na deklaraci vzájemného vztahu jednotlivých kritérií. Ty lze v jistém smyslu seřadit do hierarchie. Pokud totiž porovnáme význam zvýšení spojitosti service area, význam zlepšení vytiženosti stanic a význam ekonomické návratnosti, pak zjišťujeme, že celková významnost těchto změn pro zainteresované strany klesá s pořadím, v jakém byly vyjmenovány.

Dopad rozšíření service area, potažmo zvýšení hustoty nabíjecích stanic na území ČR, pocítí přímo či zprostředkovaně všechny zainteresované skupiny. Nejvíce by z takové změny těžili pochopitelně uživatelé vozidel, dostupnost většího území ČR přímo zvyšuje užitek, který má uživatel z elektromobilu. Může se dostat na dříve nedostupná místa, pokud uvažujeme samotnou rozlohu pokrytí a může cestovat z jednoho regionu do jiného, pokud uvažujeme odstraněnou nespojitost service area.

Rozšíření service area by se také dotklo poskytovatelů nabíjecí služby, a to na první pohled negativně. Poskytovatel by byl nucen postavit nabíjecí stanici na místě, které zatím nebylo jím, ani žádným z jeho konkurentů vybráno. To značí, že stavbu stanice v takovém místě považuje trh za nejméně rentabilní. Na druhou stranu, jestliže by se společnost rozhodla poskytovat veřejnou nabíjecí službu v daném místě, pak by získala svým způsobem lokální monopol. Toto lokální monopolní postavení první stanice na daném území by navíc bylo chráněno faktem, že motivace vstupu konkurenta na toto území by byla snížena o přítomnost již existující stanice. Lokální exkluzivita služby by pak mohla způsobit zvýšení loajality tamních zákazníků k danému poskytovateli a ti by mohli ochotněji využívat jeho služeb i při cestách mimo toto území. Pohled veřejného sektoru na rozšíření service area pouze podtrhuje stanoviska dvou uvedených skupin. Zvýšení spokojenosti občanů je obecně považováno za vrcholný zájem veřejného sektoru, motivace podnikatelů do projektů, které mohou být sice rizikové, avšak celospolečensky prospěšné, taktéž.

Kritérium vytiženosti stanice se vedle kritéria rozlohy service area jeví jako méně jednoznačné, a to především proto, že každá ze zainteresovaných stran má zcela rozdílný pohled a požadavky. Zákazníci nabíjecích stanic budou zřejmě preferovat extrémně nízkou vytiženost a maximální hustotu těchto stanic na území ČR. Důvod je stejný jako u všech systémů hromadné obsluhy, tj. čím menší vytiženost obsluhy a čím více dostupných paralelních obsluh, tím lépe z pohledu zákazníka. Zcela opačný pohled však mají investoři. Ti by nejraději maximální vytiženost nabíjecích stanic a v zásadě i co nejmenší hustotu, jelikož lze očekávat, že náklady lze lépe řídit v případě shlukování nabíjecího výkonu do několika málo větších celků než v případě velkého množství slabších nabíjecích stanic rozestých rovnoměrně po daném území. Tyto dva protichůdné pohledy doplňuje třetí, totiž že pro veřejný sektor je vytiženost stanic zcela nepodstatným faktorem. Kritérium vytiženosti stanic lze tedy považovat za důležité, jeví se však méně jednoznačné než kritérium spojitosti a rozlohy service area. Hierarchicky lze proto rozšíření service area považovat za primární kritérium, vytiženost stanic pak za sekundární.

Kritérium ekonomické návratnosti investice pak stojí hierarchicky až za těmito dvěma. Jednak proto, že víceméně vychází z vytiženosti stanice (platí, že vytiženější stanice na určitém místě bude zřejmě rentabilnější než méně vytižená stanice na tomtéž místě), zadruhé proto, že, jak již bylo řečeno v kap. 9.1.3, vyčíslení rentability je informačně extrémně náročné a při současné kvalitě informačních zdrojů tedy velmi nepřesné.

Uvážíme-li nastíněnou hierarchii optimalizačních kritérií, pak by optimalizační proces měl fungovat následujícím způsobem. Výchozím stavem je území ČR částečně pokryté nabíjecími stanicemi, viz např. obr. 25. V první fázi je stanicemi pokryto území, které není součástí obslužené oblasti. Tento proces pokračuje tak dlouho, až je celé území ČR obslužené. V druhé fázi jsou přidávány stanice podle toho, aby se zvyšovala vytiženost stanic. Zde nutno dodat, že proces přidávání stanic probíhá postupně v delším časovém horizontu. Z modelu poptávky se předpokládá růst počtu elektromobilů v čase, tedy i zájem o veřejné nabíjení. V oblastech s nedostatečnou infrastrukturou se bude zhoršovat kritérium vytiženosti stanic (stanice budou přetížené). Optimalizační algoritmus bude zasazovat do těchto oblastí nové stanice, ale pouze v takovém počtu a výkonu, aby kritérium vytiženosti stanic nezhoršil druhým extrémním stavem, totiž příliš nízkou vytižeností stanic. Až v průběhu druhé fáze se lze začít pídit po ekonomické návratnosti investice. Bylo by nutné existující množinu stanic třídit do skupin podle příslušnosti k vlastníkovi, resp. jeho investičnímu projektu, zanalyzovat jednotlivé investiční záměry, očekávané výnosnosti, zdroje financování apod., přidat vývoje cen pozemků, technologií, stav veřejných subvencí a všechny tyto aspekty brát v kontextu konkurence. Je zřejmé, že komplexnost takového úkolu je na stejné, ne-li vyšší úrovni, jako celý navrhovaný optimalizační model. Proto je nezbytné na tomto místě s politováním konstatovat, že z důvodu omezených kapacit musí být veškeré rigorózní úvahy o kritériu návratnosti investice potlačeny a čtenář se musí spokojit se sporadickými hrubými odhady.

Dalo by se namítnout, že popsaný optimalizační proces založený na diskutované hierarchii není jediný možný. Taková námitka je namísto, alternativním optimalizačním schématem může být například jakási univerzální fáze, kdy optimalizační algoritmus bude reagovat pouze na růst veřejné poptávky po nabíjecí službě. Růst poptávky v čase se předpokládá proporcionální ve všech oblastech ČR. Jak poroste poptávka, primární činností algoritmu bude optimalizace vytiženosti stanic. Pochopitelně v místech, kde stanice neexistují, bude poptávka neuspokojená. Stanice by se v těchto místech nepostavila do té doby, než by dosáhla stanovené minimální vytiženosti. V takovém případě může dojít k tomu, že v málo zalidněných venkovských oblastech nebude stanice algoritmem nikdy umístěna, neboť její vytiženost nikdy nedosáhne požadované minimální hodnoty. Řešení je zdánlivě racionální – tam, kde se veřejně nabíjí velmi málo vozidel, nemá smysl poskytovat veřejnou nabíjecí službu. Protiargument ovšem namítne, že model poptávky není dokonalý. Preference se v čase vyvíjí. Místa, která dříve lidé nenavštěvovali, se mohou stát z různých důvodů oblíbenými. Absence nabíjecí stanice v těchto místech ovšem způsobí, že k potenciálnímu zájmu návštěvníků nebude moci dojít. Protože nebude možné na tomto místě nabít vozidlo, pak se tam nebude možné dostat a místo zůstane nenavštěvované, opuštěné. Metaforou tohoto paradoxního

problému je stavba silnice. Má smysl stavět silnici tam, kam nikdo nejedí? Ale co když tam nikdo nejedí proto, že tam není silnice?

Zavedené kritérium rozšíření service area je privilegováno právě z toho důvodu, aby byl uvedený argumentační kruh příčin a následků porušen a situace měla východisko. Tedy v duchu uvedeného metaforického příkladu: Nejdříve postavme silnice vedoucí všude a počkejme, jak s nimi lidé naloží.

## 9.2 Motivace k formátu optimalizačního modelu

Optimalizační model je navržen jako samostatný, iterativně použitelný modul, jehož ukotvení do času a situace definují data, která jsou jeho vstupem. Tato formulace si zaslouží vysvětlení. Optimalizační modely jsou často implicitně statické, časové rozlišení jejich použití není vůbec diskutováno ani uvažováno. To ale neznamená, že by tyto modely nepracovaly s časovou dimenzí, pochopitelně se běžně optimalizuje vývoj veličin v čase, optimalizují se sekvence kroků, optimalizuje se chování systémů v čase. Všechny tyto příklady, aniž by to vůbec zmínily, ovšem používají optimalizační model staticky, ve smyslu jednorázově, případně opakovaně s jinými parametry, ale každý běh optimalizačního procesu je zcela nezávislý na ostatních. Nazývat takové optimalizační modely jako statické je mírně řečeno nepřesné, jelikož časová dimenze na této úrovni abstrakce (kontextovém rámci, ve kterém je optimalizační model spuštěn) nebývá vůbec uvažována. Proto bychom měli nazvat statickým spíše tento kontextový rámec použití modelu než samostatný optimalizační model.

Navržený optimalizační model byl postaven tak, aby se ve svém kontextovém rámci použití choval dynamicky, tzn. aby optimalizační proces sestával z iterativního pouštění optimalizačního modelu, jehož výstupy v jedné iteraci budou použity jako vstupy v iteraci následující. Platí tedy, že některé výstupy modelu jsou typově stejné jako jeho vstupy, z kontextového hlediska ovšem pojednávají o jiném časovém úseku. Pokud „některé“ výstupy mají tuto povahu, pak „ostatní“ výstupy modelu jsou zejména ukazateli aktuální situace, tj. mají povahu aktuálních hlášení. V následujících dvou kapitolách bude popsán klíčový problém provázanosti jednotlivých iterací, jejich vstupů, výstupů a reálných dat, který zajišťuje, aby optimalizační model byl nejen konzistentní, ale také aby reflektoval aktuálně popisovanou situaci co nejpřesněji.

## 9.3 Časové rozlišení datových souborů a optimalizačních fází

Proces optimalizace se vztahuje vždy k určitému výchozímu času  $t_0$ . V tomto čase je důležité sumarizovat a striktně rozlišovat aktuálně dostupné typy datových souborů. Ty se dělí na:

- Reálné datové soubory pro čas  $t_0$ .
- Predikované datové soubory pro čas  $t_1$  založené na reálných datech z času  $t_0$ .
- Predikované datové soubory pro čas  $t_2$  založené na predikovaných datech pro čas  $t_1$

Je zřejmé, že čím hlubší rekurze do budoucnosti bude použita, tím méně přesné budou získané datové soubory. Klíčovým problémem v tomto ohledu je identifikovat takové datové soubory, které budou získány nebo vytvořeny s co nejnižší hloubkou rekurze, ale které umožní predikci do budoucnosti v požadovaném rozsahu.

Data, se kterými model pracuje, totiž nejsou vždy přímo empiricky zjištěná. Často jde o data, která vznikla aproximací pomocí jiných dílčích modelů. Z časového hlediska pak jde o data popisující stav v bližší budoucnosti než tu, kterou právě modelujeme. Typickým příkladem může být následující příklad: aktuálně je Q1 2018, do modelu vkládáme dříve vypočtená data za Q3 2018 a snažíme se z nich vypočíst hodnoty pro Q4 2018. Přesnost výsledných hodnot pro Q4 2018 bude závislá na kvalitě předchozí predikce na Q3 2018 a tak dále až do doby, kdy byl datový soubor zjištěn empiricky.

Při praktickém nasazení modelu se tedy musíme snažit, abychom měli za každou cenu co nejaktuálnější empirická data a abychom nepredikovali příliš hluboko do budoucnosti. Tento zcela očividný požadavek je však pouze polovinou skládky. Zadruhé, při praktickém použití, kdy model využíváme jako nástroj k určení míst pro vhodné investice do infrastruktury, probíhá toto modelování postupně v čase a v měnícím se prostředí. Aby byl model schopen spolehlivých predikcí, je třeba vždy těsně před každým během modelu nahrát do něj empirická data, nikoliv ta predikovaná z předchozího běhu optimalizace.

Typickým příkladem je poptávka po nabíjecí službě. Řekněme, že chceme v období Q4 2017 odhadovat poptávku po nabíjecí službě v Q1 2018 na základě znalosti počtu provozovaných elektromobilů za období Q1 2017 (pozdější statistiky v dané době neexistují nebo je není možné získat). Řekněme, že dojdeme k závěru, že v Q1 2018 se na silnicích ČR bude pohybovat aktivně 1500 vozidel. O rok později, tedy v Q4 2018 budeme chtít znovu provést optimalizaci, tentokrát na období Q1 2019. Nejnovější dostupná data budou k dispozici za období Q1 2018 a budou tvrdit, že vozidel v té době se pohybovalo v ČR jen 1200. Pochopitelně, pro další běh optimalizačního modelu musíme počítat nikoliv s původní predikovanou hodnotou 1500, ale empiricky zjištěnou hodnotou 1200. Analogicky to platí pro model nabídky a databázi aktuálně používaných nabíjecích stanic. To, že nám model doporučí v nějakém období přidat do sítě stanic 3 nabíjecí stanice, a my je tam přidáme, tak to ještě neznamená, že se síť stanic zvětšila o 3 stanice. Některé stanice mohly zaniknout, některé nové stanice mohla postavit konkurence. Musíme proto i v případě nabídky stáhnout a zpracovat co nejaktuálnější empirická data, nikoliv pracovat s těmi dříve vypočtenými.

Toto konstatování se zdá býti triviálním faktem. Ve skutečnosti však může často docházet k tomu, že opakovaným užíváním modelu má uživatel najednou k dispozici datové soubory, které popisují nějakou skutečnost v minulosti. Tyto soubory ovšem nebyly získány empiricky, nýbrž byly v minulosti získány jako výstupy predikčních modelů, avšak tuto informaci nikde viditelně nenesou (popř. ji nesou, avšak uživatel ji neočekává, takže ji automaticky ignoruje a nezachytí). Tím pádem s těmito daty následně chybně nakládá jako kdyby se jednalo o data empiricky zjištěná.

Posledním tématem vztahujícím se k časovým aspektům optimalizace je rozlišení optimalizačních fází. Zde je třeba detailněji rozebrat různé smysly výstupu optimalizačního modelu. V neustále se měnícím konkurenčním prostředí poskytovatelů nabíjecí služby s dynamicky proměnlivou poptávkou po nabíjecí službě může být zcela dostačujícím smyslem modelu korekce nesrovnalostí mezi minulou predikcí a vývojem reality. Tuto fázi bychom mohli nazvat korekční a její smysl by byl následující: Jeden z mnoha subjektů budujících nabíjecí infrastrukturu používá tento model a snaží se s jeho pomocí rozmisťovat své stanice. V průběhu času však zjišťuje, že získávané predikce pochopitelně nejsou přesné a realita se ubírá mírně jiným směrem. Například, model záměrně vůbec nepracuje z možnosti, že by se v následujícím predikovaném období nějak samovolně zvyšovala nabídka, tj. že by nějak samovolně (například působením jiných hráčů na trhu) vznikaly nabíjecí stanice. To ovšem znamená, že z hlediska uživatelů modelu bude na daném území téměř vždy jiný počet stanic, než se kterým v modelu pracují. Korekční fáze optimalizace tak bude pouze reagovat na nesrovnalosti mezi predikovaným a reálným vývojem reality. Charakteristikou této fáze je predikce do co možná nejbližší budoucnosti, resp. korekce současného stavu. Model se nesnaží plošně zvyšovat nabízené množství stanic, snaží se spíše reagovat na ty případy, kdy aktuálně existuje neuspokojená poptávka po nabíjecí službě. Na těchto místech se pak snaží budovat stanice v takovém množství a výkonu, aby byla tato aktuální poptávka uspokojena.

Na druhé straně lze uvažovat fázi růstovou, kdy model bude předpovídat poptávku hluboko do budoucnosti a bude se snažit plošně navyšovat počty nabíjecích stanic. Smyslem této fáze je rozvoj infrastruktury na potenciálně velmi vytižených místech jako jsou oblasti podél dálnic a rychlostních silnic, stejně jako oblasti obcí. Zde nicméně připomeňme, že model zcela ignoruje poptávku v obcích, jelikož základní datový soubor ŘSD neobsahuje informace o provozu uvnitř obcí. Pokud by někdy v budoucnu tato data byla k dispozici, dají se do modelu (do dílčího modelu poptávky z kap. 6) jednoduše zahrnout.

## 9.4 Účelová funkce

Ústředním objektem optimalizačního modelu je účelová funkce reprezentující navržená kritéria optimality. Účelovou funkcí bývá obvykle algebraický vztah, tj. funkce, jejíž argumentem je vektor hodnot proměnných a její funkční hodnotou je skalár (v případě jednokriteriální optimalizace) kvantifikující míru optimálnosti tohoto vektoru proměnných. Jinými slovy, účelová funkce ohodnocuje, nakolik jsou její vstupy optimální. Toto poslední tvrzení samozřejmě platí i pro navrženou účelovou funkci modelu CSPP, která však nemá podobu algebraické rovnice.

Účelová funkce jako taková je reprezentována funkcí

```
[fval] = mainObjectiveFunction(stationSet, rmax, timespan)
```

Nejdůležitějším vstupem funkce je množina všech nabíjecích stanic na území ČR, které v daný moment uvažujeme. V této množině jsou zahrnuty již existující stanice, ale i

stanice, které přidává optimalizační algoritmus jako potenciální nové. Proměnná  $r_{\max}$  je parametrem definujícím poloměr SA, proměnná  $\text{timespan}$  pak ukotvuje situaci do časového rámce.

Funkce `mainObjectiveFunction()` je vrcholným výsledkem kombinace modelu poptávky, modelu nabídky a modelu jejich vzájemné interakce, tedy kapitol 6, 7 a 8. Jejím ústředním cílem je předat své vstupní parametry funkci `queueModel()`, což je navržený, výše popsaný simulátor nabíjení, a jeho výstupy formulovat do jediného ukazatele – hodnoty účelové funkce. K tomu využívá celkem 5 dílčích kritérií.

#### 9.4.1 Dílčí kritéria

Prvním dílčím kritériem je míra nepokrytí území ČR veřejně obsluhovanou oblastí. Připomeňme, že se jedná o oblast, pro níž platí, že z kteréhokoliv jejího bodu je nejbližší veřejná nabíjecí stanice dostupná nejvýše v geodetické vzdálenosti  $r_{\max}$ , což odpovídá skutečné cestovní vzdálenosti v rámci silniční sítě menší než  $d_{\max}$  s 95 % spolehlivostí. Tuto oblast ilustruje obr. 25 pro specifickou hodnotu parametru  $r_{\max}$ . První kritérium tedy udává, jaký podíl území ČR není veřejně obsluhováno. Je zřejmé, že tato metrika nabývá hodnoty z intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ , přičemž čím menší hodnota, tím lépe.

Druhým dílčím kritériem je míra neuspokojitelné poptávky po nabíjecí službě. Jedná se o ukazatel beroucí v potaz oblasti neobsluhované veřejnou nabíjecí službou a poptávku po nabíjecí službě, která se v nich vyskytuje. Kritérium je počítáno jako podíl vozidel, která nemohla být obslužena sítí veřejných nabíjecích stanic na celkovém počtu vozidel poptávajícím veřejnou nabíjecí službu na území ČR. Analogicky k prvnímu kritériu, i zde platí, že jeho hodnota se pohybuje v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ , přičemž čím menší hodnota, tím lépe. Platí, že jakmile bude celé území ČR spadat do obsluhované oblasti, hodnota tohoto kritéria bude rovna nule.

Třetím kritériem je celková poptávkově-vážená vzdálenost z kap. 8.5.1, resp. rov. 30. Jde o kritérium kvantifikující aktuální rozprostření nabíjecích stanic z hlediska prostorového rozprostření poptávky po nabíjecí službě. Ukazatel je detailněji popsán v příslušné kapitole a optimalizačním kritériem se stává v momentě, kdy konstatujeme, že jeho obor hodnot je v intervalu  $\langle 0,\infty \rangle$ , přičemž čím nižší hodnota, tím lépe. Poznamenejme, že ukazatel zřejmě nikdy nenabyde hodnoty 0, ani se jí nijak výrazně nepřiblíží, jelikož toto by mohlo nastat pouze v případě, že by v každém bodě ČR existovala nabíjecí stanice, tedy že by vzdálenost každého uvažovaného bodu od nejbližší veřejné nabíjecí stanice byla rovna nule.

Čtvrtým kritériem je míra vytíženosti nabíjecích stanic. Jde o první z dvojice ukazatelů, které produkuje simulátor nabíjení reprezentovaný funkcí `queueModel()` a popisovaný v kapitole 8.5.3. Ukazatel udává, kolik procent času jsou připojení nabíjecích stanic obsazena. Takto definován nabývá ukazatel hodnot z intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ , přičemž platí, že čím vyšší vytíženost stanic, tím lépe. Protože se tato poslední vlastnost liší od ostatních kritérií, je vhodné ukazatel upravit a vytvořit kritérium nevytíženosti nabíjecích stanic,

keré bude udávat, jaké procento času nejsou nabíjecí místa stanic během sledovaného období využita. Provedeme-li úpravu jako  $C_4 = 1 - U_4$ , kde  $U_4$  jsou hodnoty prvního ukazatele a  $C_4$  jsou hodnoty čtvrtého kritéria, pak dostáváme obor hodnot rovněž z intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ , přičemž nyní platí že čím nižší nevytíženost, tím lépe.

Pátým dílčím kritériem je míra odmítnutí příjíždějících vozidel. Jde o druhý z dvojice ukazatelů z kapitoly 8.5.3, který udává podíl vozidel odmítnutých nabíjecí stanicí z důvodu obsazenosti všech přípojných míst na celkovém počtu příjíždějících vozidel. Tento ukazatel byl již řádně upraven při jeho vytvoření a je tedy možné ztotožnit jej s kritériem optimality. Oborem hodnot tohoto kritéria je interval  $\langle 0,1 \rangle$ , přičemž platí, že čím nižší míra odmítnutí, tím lépe.

#### 9.4.2 Agregace, normalizace a prioritizace dílčích kritérií

V kapitole 9.1 se polemizuje nad rozdíly mezi jednokritériální a vícekritériální optimalizací a jejich vztahu k navrhovanému optimalizačnímu problému. Je konstatováno, že jednokritériální optimalizace je vhodnější, a tudíž v této kapitole musí být popsán způsob, jakým bude pět představených dílčích kritérií agregováno do jediného optimalizačního kritéria.

Je nezbytné vytvořit jediné agregované kritérium, pro které bude platit, že změnou hodnoty jakéhokoliv z dílčích kritérií se současně změní hodnota kritéria agregovaného. Dílčí kritéria byla všechna záměrně definována jako minimalizační, agregované kritérium bude tedy rovněž minimalizační. Necht'  $Z_{\min}$  je hodnota účelové funkce, tedy hodnota agregovaného optimalizačního kritéria. Potom v rov. 31 představuje proměnná  $c_i$  hodnoty jednotlivých dílčích kritérií, proměnná  $n_i$  představuje hodnoty normalizačního parametru pro  $i$ -té kritérium a  $p_i$  představuje hodnoty  $i$ -tého váhového parametru prioritizace.

$$Z_{\min} = \sum_{i=1}^5 p_i n_i c_i \quad \text{Rov. 31}$$

Hodnoty dílčích kritérií mají různou škálu. Obory hodnot čtyř z nich spadají do intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ , jedno kritérium (konkrétně jde o kritérium poptávkově-vážené vzdálenosti), má obor hodnot  $\langle 0,\infty \rangle$ . Obory hodnot ovšem nejsou dostatečným ukazatel variability hodnot dílčích kritérií. Například hodnota čtvrtého kritéria, nevytíženosti nabíjecích stanic, se nikdy nebude příliš blížit hodnotě 0, tedy maximální vytíženosti. Je to způsobeno tím, jak fungují generátory příjezdů a odjezdů a také tím, že do modelu není záměrně implementována fronta požadavků. Reálně lze tedy očekávat, že hodnota kritéria se bude pohybovat v intervalu přibližně  $\langle 0.3,1 \rangle$ . Analogická situace platí i u ostatních kritérií. Namísto intervalů oborů hodnot je tedy vhodnější snažit se odhadnout interval, v němž se budou hodnoty jednotlivých kritérií reálně pohybovat, načež tyto intervaly budou základem pro stanovení normalizačních parametrů.



Tab. 7: Očekávané reálné rozpětí hodnot dílčích kritérií

#	Kritérium	Obor hodnot	Reálný interval	Odůvodnění rozdílu
1	Neobsluhovaná oblast	$\langle 0,1 \rangle$	$\langle 0, 0.4 \rangle$	Už nějaké nabíjecí stanice existují, pokrývají minimálně 60 % území ČR (při $r_{max} = 22$ km).
2	Neuspokojitelná poptávka	$\langle 0,1 \rangle$	$\langle 0, 0.3 \rangle$	Viz kritérium #1 + existující stanice pokrývají převážně oblasti s vysokou poptávkou. Celková neuspokojitelná poptávka je proto menší než neobsluhovaná oblast.
3	Poptávkově-vážená vzdálenost	$\langle 0,\infty \rangle$	$\langle 10^2, 10^4 \rangle$	Velmi hrubý odhad, nelze předpovědět pro velký nárůst počtu elektromobilů. Aktuální hodnota kolem $10^3$ .
4	Míra nevytíženosti stanic	$\langle 0,1 \rangle$	$\langle 0.3, 1 \rangle$	Návrh funkce <code>stationSimulator()</code> , absence fronty, denní cyklus poptávky.
5	Míra odmítnutých vozidel	$\langle 0,1 \rangle$	$\langle 0, 0.2 \rangle - \langle 0, 0.8 \rangle$	Závisí na tom, nakolik bude vývoj růstu nabíjecí infrastruktury kopírovat vývoj trhu s PEV. Hodnota 0.2 znamená, že každé 5. vozidlo bude odmítnuto, hodnota 0.8 znamená, že 4 z 5 vozidel budou odmítnuty. Aktuální hodnota kolem 0.002.

(Zdroj: vlastní zpracování, zejm. pomocí `mainObjectiveFunction.m`)

Závěry z tab. 7 využijeme ke stanovení vektoru normalizačních vah. Ten musí být nastaven tak, aby změna v dílčích kritériích měla rovnocenný efekt na agregované kritérium. Abychom totiž mohli správně nastavit prioritu kritérií, musíme je nejdřív normalizovat. K přesnému vyvážení dílčích kritérií patrně nikdy nedojde, přesto je nastavení normalizačního vektoru důležité pro správné vyznění agregovaného kritéria. Kritéria #1 a #2 můžeme považovat za podobná a zdvojnásobit je, aby se jejich reálné hodnoty rozprostřely přibližně na interval  $\langle 0,1 \rangle$ . Horní hranice obou je dána existující infrastrukturou a je tudíž velmi pevná. Mírné výkyvy může způsobovat uvažování jiné hodnoty parametru  $r_{max}$ . Kritérium #3 má oproti ostatním poměrně velké rozpětí, které je navíc odhadnuto velmi hrubě. Pro nastavení normalizačního koeficientu vycházejme z hodnoty kritéria platící pro aktuální stav nabíjecí infrastruktury a trhu s elektromobily, což implikuje hodnotu 0,001. Kritérium #4 má obor hodnot  $\langle 0,1 \rangle$ , přičemž bylo omezeno na  $\langle 0.3, 1 \rangle$  z důvodů, které lze považovat sice za platné, ale spíše slabé. Například pokud by do simulační funkce byla přidána fronta, pak se dolní hranice intervalu rozvolní a můžeme reálně očekávat hodnoty  $\langle 0.2, 1 \rangle$ , či dokonce  $\langle 0.1, 1 \rangle$ . Rovněž nelze obecně tvrdit, že stanice nebudou používány uživateli k nočnímu nabíjení, což by způsobilo jejich nezávislost na denním cyklu. Z toho důvodu ponechme čtvrtému kritériu celý obor hodnot a nastavme pro něj normalizační koeficient 1. Hodnota kritéria #5 je aktuálně velmi blízká nule. Je to tím, že veřejná nabíjecí infrastruktura je kapacitně poměrně dobře dimenzována na aktuálně nepříliš významnou poptávku. Jak bude vozidel přibývat, poroste poptávka po veřejné nabíjecí službě a hodnota tohoto kritéria bude růst. Interval  $\langle 0, 0.2 \rangle$  pracuje s hypotézou, že maximálně 20 % vozidel bude stanic odmítnuto. Toto množství je dostatečně veliké na to, aby mohlo být považováno za racionální horní hranici, tedy je možné přiřadit kritériu normalizační koeficient 5. Pokud by míra odmítnutých vozidel někdy přesáhla 20 %, pak hodnota kritéria bude větší než 1 a

kritérium tak bude zvýhodňováno vůči ostatním. Jenomže v případě nadměrně vysoké míry odmítnutých vozidel je právě extra prioritizace tohoto kritéria žádoucí. Nastavení koeficientů uvedeným způsobem má tedy nezamýšlený samoregulační efekt. Normalizační koeficienty jednotlivých kritérií lze najít v tab. 8.

Tab. 8: Váhové koeficienty normalizace a priority

#	Kritérium	Koef. normalizace $n$	Koef. priority $p$
1	Neobsluhovaná oblast	2	100
2	Neuspokojitelná poptávka	2	100
3	Poptávkově-vážená vzdálenost	0.001	1
4	Míra nevytíženosti stanic	1	10
5	Míra odmítnutých vozidel	5	10

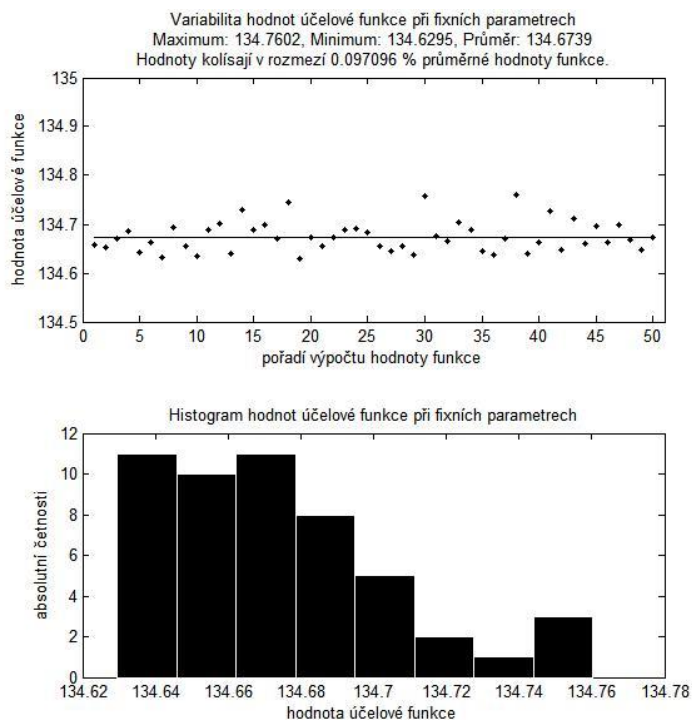
(Zdroj: vlastní zpracování)

Prioritizace dílčích kritérií vychází z argumentace v kapitole 9.1, kde bylo řečeno, že některá dílčí kritéria by měla být důležitější než jiná. Aby se tento efekt promítl do jednokritériální optimalizace, je nutné přiřadit v účelové funkci vyšší váhu kritériím důležitějším a menší váhu kritériím méně důležitým. To způsobí, že optimalizační algoritmus bude citlivější na důležitější kritéria a méně citlivý na kritéria méně důležitá. Bohužel neexistuje jednoznačný způsob, jak prioritní váhy kritériím nastavit. Jednou z možných cest je použití odlišení pomocí řádu. To znamená, že pokud uvažujeme ordinální škálu priorit, pak dvěma kritériím jdoucím po sobě v této škále přiřadíme takové hodnoty vah, které se budou lišit o řád čísla. Pokud tedy kritériu s nejnižší prioritou přiřadíme koeficient 1, pak důležitějším kritériu přiřadíme koeficient 10 a ještě důležitějším koeficient 100 atd. Tímto způsobem jsou jednotlivým kritériím přiřazeny koeficienty priority v tab. 8.

Z téže tabulky je patrné, že z hlediska priority rozlišujeme tři stupně. Za nejdůležitější dílčí kritéria jsou považována kritéria #1 a #2. Toto vychází z argumentace zejména v kap. 9.1.5, přičemž ještě konstatujeme, že obě tato kritéria odkazují víceméně ke stejnému cíli – rozšiřování service area. Dalšími v pořadí důležitosti jsou kritéria #4 a #5. Ta souvisí s optimalizací situace přímo u nabíjecích stanic, kde optimalizační algoritmus musí vyvažovat mezi příliš nevytíženými (tzn. málo vytíženými) stanicemi a mírou odmítnutých vozidel, které musely opustit stanici, jelikož v době jejich příjezdu nebyly k dispozici volné nabíjecí konektory. Zde navíc platí, že provoz málo vytížených stanic v daném rozsahu zřejmě nebude ekonomicky atraktivní. Cílem těchto kritérií je hodnotit nabíjecí infrastrukturu z hlediska kapacity jednotlivých nabíjecích stanic. Nejméně důležitým je kritérium #3 pojednávající o optimalitě prostorového rozmístění nabíjecích stanic. Toto kritérium přímo nesouvisí s žádným cílem, byť nepřímo napomáhá oběma uvedeným. Dalo by se říct, že jde o pomocné kritérium, jehož hodnota bude napomáhat v měření aktuálního stavu nabíjecí infrastruktury. To odůvodňuje jeho nejmenší koeficient priority.

### 9.4.3 Determinismus účelové funkce

Nyní pojednejme o povaze účelové funkce z hlediska determinismu, tedy prozkoumejme, zda a případně nakolik se mění hodnoty účelové funkce, jestliže se nemění hodnoty jejích vstupních parametrů. Tato otázka se může zdát poněkud nečekanou, neboť v běžných optimalizačních modelech je determinismus očekáván, či dokonce vyžadován. Připomeňme, že účelová funkce je založena primárně na simulátoru nabíjení, který využívá několika generátorů diskretních náhodných událostí. Touto cestou se do účelové funkce dostává náhoda, přičemž nyní je cílem určit sílu jejího vlivu. Abychom ho zjistili, provedeme experimentální opakovaný výpočet hodnoty účelové funkce, přičemž při každém puštění ponecháme její vstupní parametry stejné, nezměněné. Výsledky sumarizuje obr. 36.



Obr. 36: Výsledky testu náhodnosti účelové funkce  
(Zdroj: vlastní zpracování, pomocí `determinismTest.m`)

Po 50 výpočtech účelové funkce se její hodnota pohybovala přibližně v rozmezí od 134.63 do 134.76. Tento výsledek můžeme interpretovat tak, že kolísání hodnoty účelové funkce je v řádu 0.01 % její průměrné hodnoty, alternativně 0.13 v absolutní hodnotě. To znamená, že jakýkoliv údaj, který nám účelová funkce poskytne, je zatížen řádově touto chybou. Optimalizační algoritmus by ve svých kritériích zastavení výpočtu měl tuto chybu brát v potaz a takto malým změnám hodnoty účelové funkce nevěnovat pozornost.

## 9.5 Předoptimalizační analýza výpočetní náročnosti

Než bude možné začít pojednávat o optimalizačních metodách, je potřeba se vyjádřit k výpočetní náročnosti účelové funkce. Účelová funkce stojí největší měrou na modelu interakce vozidel a stanic – funkci `queueModel()` a v ní zejména pak funkci

`assignDemand()`. Ta pracuje s datovou strukturou *meshe* (v prostředí MATLAB se jedná o matici), na které provádí operace měření délky. Každá z  $n$  nabíjecích stanic má právě jednu tuto matici vzdáleností. Celkem je tedy potřeba vypočítat  $n$  matic velikosti  $2500 \times 1500$ , přičemž na každou buňku se aplikuje vzorec pro výpočet geodetické vzdálenosti dvou bodů (kap. 5.7). První problém nastává v momentě, kdy pro správné přiřazení nejnížší vzdálenosti každé stanici potřebujeme znát všechny hodnoty všech  $n$  matic. Přímocharý postup by totiž vyžadoval mít alokované pole velikosti  $n \times 2500 \times 1500$  hodnot s 64 bitovou přesností, což si pro hodnoty  $n \geq 150$  žádá více než 4.5 GB alokované operační paměti. Objektivně vzato to není až tak mnoho, ovšem pro PC s instalovanými 8 GB operační paměti, kde byl celý model vyvíjen, jde o hranici, kdy operační systém začíná využívat virtuální paměť, což dost výrazně zpomaluje výpočet. Tento problém je naštěstí řešitelný poměrně jednoduše bez nutnosti upgradovat hardware. Funkce je přepsána tak, že se nealokuje celé pole, ale pouze jeho části velikosti  $n \times 2500 \times k$ , kde  $k$  je libovolné přirozené číslo dělitelé beze zbytku číslo 1500. Tak se pole zpracovává postupně, v dávkách a výsledky jsou v závěru agregovány.

Druhým a podstatně hůře řešitelným problémem je časová náročnost takového výpočtu. Jak dostatečně detailně uvádí předchozí kapitoly, optimalizační model je sestaven z několika dílčích, poměrně provázaných modelů, jejichž tvorba leží v rozmezí přibližně 2 let. Při jejich vzniku, ani později při jejich kombinaci do výsledného optimalizačního modelu, nebyl nikdy brán zřetel na jejich výpočetní náročnost. Všechny modely byly vyvíjeny na jediném vláknu CPU, kód nebyl nijak upravován za účelem paralelizace. Autor se nicméně snažil na příhodných místech využívat rychlé algoritmické konstrukce, zejména vektorizaci, ze které MATLAB silně profituje, aby i neparalelizovaný kód běžel co nejrychleji.

Ostatně od samého počátku úvah o optimalizačním modelu bylo cílem navrhnout model, jehož primárním kritériem kvality bude věrnost reprezentace reality. Již tehdy bylo deklarováno, že tvorba modelu nesmí být ovlivněna metodou jeho řešení, tedy že nejprve má být vytvořen model bez omezení vztahujícím se k možnostem, jak tento model řešit, a až poté bude přistoupeno k problému řešení modelu. Tento záměr byl odůvodněn tím, že se mělo vyhnout záměrnému zjednodušování modelu, nebo jeho „ohýbání“ za cílem zjednodušit si práci při hledání metody jeho řešení. Toto bylo deklarováno již v úvodním článku o problému rozmístění nabíjecí infrastruktury [105].

Po důsledné aplikaci těchto prací komplikujících úvah, a naopak při využití vhodných nástrojů a metod zrychlujících výpočet účelové funkce na jednom jádře, dostáváme do rukou relativně rychlý model; relativně pokud uvážíme, jaké výpočty jsou nezbytné. Změřit jeho rychlost, tzn. časovou náročnost jeho výpočtu, je možné různým způsobem. Nejpřesnější je vytvoření měřících bodů (pomocí funkcí `tic` a `toc`) přímo v modelu, které produkují přesný čas, který MATLAB potřebuje k výpočtu programu mezi těmito dvěma body. Než se pustíme do komentáře výstupů měření v tab. 9, je vhodné vysvětlit co a kolikrát se vlastně pouští. Účelová funkce je momentálně objektem našeho zájmu, nicméně v tomto konkrétním případě je volána jednoduchým optimalizačním solverem, které je navrženo tak, aby pracoval se vstupními parametry jako s jedinci určité populace.

Toto vychází z chápání optimalizace jako heuristického procesu, což bude vysvětleno dostatečně podrobně v kap 10. Zde je důležité, že optimalizační solver vytváří 3 množiny vstupních parametrů (3 jedince určité populace) a tyto postupně předává účelové funkci k ohodnocení. Jakmile toto proběhne, vytvoří nové 3 množiny vstupních parametrů a proces opakuje. Každý tento iterativní krok je výpočtem jedné populace jedinců, pokud by byly populace mezi sebou provázané, nazvali bychom je generacemi. Potřebný výpočetní čas se měří u každého jedince, ale i u každé generace, která pochopitelně musí být minimálně součtem všech tří jedinců. Minimálně proto, že navíc existuje režie na předávání parametrů, tvorbu populace apod.

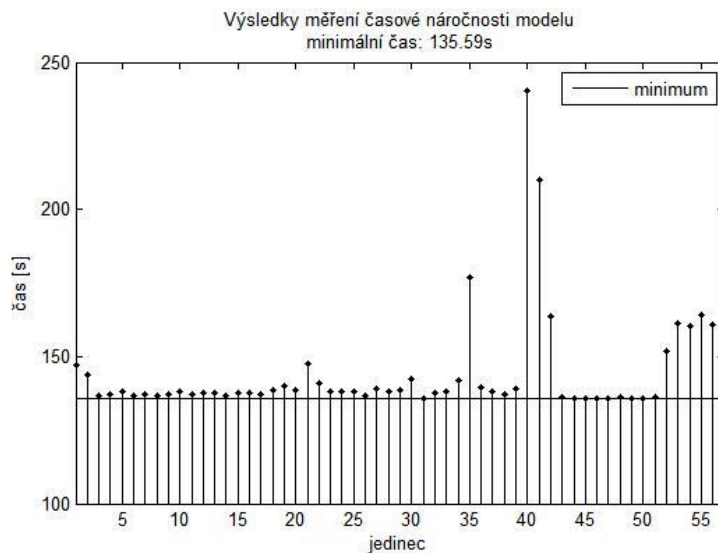
Tab. 9: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce: 1-thread CPU

populace	jedinec	čas jedinec [s]	čas populace [s]	populace	jedinec	čas jedinec [s]	čas populace [s]
1	1	146,92	443,29	11	1	135,85	426,97
	2	143,97			2	137,41	
	3	136,60			3	138,04	
2	1	137,28	427,45	12	1	141,65	505,10
	2	137,99			2	176,68	
	3	136,87			3	139,53	
3	1	136,96	425,88	13	1	138,05	449,65
	2	136,47			2	136,91	
	3	137,18			3	139,21	
4	1	137,91	428,13	14	1	240,53	731,89
	2	137,19			2	210,22	
	3	137,60			3	163,75	
5	1	137,45	427,04	15	1	136,19	422,91
	2	136,88			2	135,93	
	3	137,39			3	135,78	
6	1	137,45	428,89	16	1	135,88	423,04
	2	137,38			2	135,91	
	3	138,66			3	136,13	
7	1	139,82	441,57	17	1	135,60	422,64
	2	138,65			2	135,59	
	3	147,42			3	136,24	
8	1	141,01	431,95	18	1	151,78	490,69
	2	137,90			2	161,19	
	3	137,90			3	160,15	
9	1	137,92	428,98	19	1	163,99	491,60
	2	136,55			2	161,03	
	3	139,16			3	149,85	
10	1	137,91	434,83				
	2	138,60					
	3	142,54					

(Zdroj: vlastní zpracování)

V tab. 9 jsou k dispozici výsledky měření v případě běžného způsobu výpočtu za použití jediného výpočetního vlákna procesoru. Tento způsob nazvěme 1-thread CPU. Pozorujeme, že byť hodnoty jednotlivých jedinců kolísají, snaží se přiblížit určitému minimálnímu času, který lze chápat jako skutečný (ideální) výpočetní čas potřebný pro výpočet účelové funkce. K jeho stanovení tedy nepoužijeme průměr těchto časů, ale minimum z těchto hodnot. Lépe než tabulka toto demonstruje grafická reprezentace výsledků na obr. 37. Na něm vidíme, jak se čas výpočtu většiny jedinců pohybuje u minimální hranice. Výkyvy směrem nahoru jsou způsobeny operačním systémem, který čas od času přiřadí procesorovému vláknu, které má na starosti výpočet, i jiné úkoly.

Tento jev je běžný zejména u standardních uživatelských PC, kde operační systém a instalované programy nemají nějakou sofistikovanější kontrolu prostředků nebo frontu priorit jejich přidělování. Tato poslední skutečnost je důvod, proč je vhodnější používat minimální hodnotu výpočetního času namísto průměrné k určení skutečné hodnoty výpočetního času algoritmu.



Obr. 37: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, tic měření, 1-thread CPU  
(Zdroj: vlastní zpracování, pomocí `computingStatisticsCPU.m`)

Místo přímého měření času umožňuje MATLAB pomocí tzv. profileru měřit výpočetní náročnost jednotlivých funkcí. Výsledky měření tímto druhým způsobem pro stejná data jako v případě obr. 37 jsou k dispozici na obr. 38. Tato statistika pojednává o jednotlivých funkcích, počtech jejich volání a času, který tato volání celkem zabrala. Ze statistiky vidíme, že celkově trvalo solveru `GAnormalSolver` přibližně 8682 sekund, než dokončil výpočet 57 volání účelové funkce `mainObjectiveFunction()`. V rámci ní byl časově nejnáročnější výpočet funkce `queueModel()`, což je mnohokrát diskutovaný model interakce nabíjecích stanic a vozidel. V něm je volána funkce `assignDemand()` s nejdéle trvajícím článkem výpočtu – funkcí stanovení vzdálenostních matic `distDiminish()`. Vidíme, že tato funkce je v dané implementaci volána celkem 13 004 664 krát. Toto číslo je násobkem 57 volání účelové funkce, 152 stanic a 1501 řádků vzdálenostní matice. Funkce tedy počítá více než 13 milionkrát vzdálenost mezi pozicí jedné stanice a 2501 body každého z řádků meshe. To jí zabere přibližně 5729 sekund.

Pro účely porovnání je vhodné spočítat, jak dlouho trval průměrně výpočet matice vzdáleností pro jednu účelovou funkci (označme  $D_{1CPU}$ ) a také, jak dlouho trval celkový výpočet jedné účelové funkce (označme  $Z_{1CPU}$ ). Hodnotu  $D_{1CPU}$  stanovíme jako čas potřebný na funkci `distDiminish()` a počet volání této funkce.  $\frac{5729}{57} \cong 100,51$  s. Hodnotu  $Z_{1CPU}$  získáme analogicky použitím celkového času:  $\frac{8682}{57} \cong 152,32$  s. Vidíme tedy, že asi dvě třetiny celkového času výpočtu účelové funkce  $Z_{1CPU}$  zabírá stanovení

matice vzdáleností. Hodnota  $Z_{1CPU}$  je o něco vyšší než hodnoty z tab. 9 a obr. 37, jelikož jde o průměr ze všech iterací, i těch neočekávaně zpomalených. Vyšší hodnotě také přispívá mírná, v předchozím případě vynechaná režie v optimalizačním solveru.

**Profile Summary**  
Generated 30-Aug-2017 12:37:50 using cpu time.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
<a href="#">GAnormalSolver</a>	1	8682.491 s	2.141 s	
<a href="#">mainObjectiveFunction</a>	57	8680.341 s	17.338 s	
<a href="#">queueModel</a>	57	8510.888 s	89.599 s	
<a href="#">assignDemand</a>	57	8229.149 s	1681.014 s	
<a href="#">distDiminish</a>	13004664	5729.379 s	5729.379 s	
<a href="#">demand2meshgrid</a>	57	616.819 s	448.175 s	
<a href="#">getCRborder</a>	114	300.738 s	24.290 s	
<a href="#">shaperead</a>	114	194.695 s	0.028 s	
<a href="#">shaperead&gt;dbfread</a>	114	167.334 s	154.877 s	
<a href="#">nansum</a>	17442	154.300 s	154.300 s	
<a href="#">fullRepublicCoverTest</a>	57	150.425 s	13.864 s	
<a href="#">stationSimulator</a>	788424	92.315 s	52.889 s	
<a href="#">f_philamH_wgs_to_XYH_itsk</a>	649914	81.730 s	72.483 s	
<a href="#">sortrows</a>	1061969	41.410 s	19.738 s	
<a href="#">generateArrivals</a>	5187	26.544 s	4.386 s	
<a href="#">nanmax</a>	85557	24.191 s	24.191 s	
<a href="#">carArrivalGenerator</a>	788424	22.158 s	9.632 s	
<a href="#">sortrows&gt;sort_back_to_front</a>	1061795	21.672 s	21.672 s	
<a href="#">nanmin</a>	85557	21.664 s	21.664 s	
<a href="#">SOCgenerator</a>	5187	16.733 s	9.035 s	
<a href="#">mapformats\private\openShapeFiles</a>	114	16.562 s	3.734 s	
<a href="#">customRNG</a>	798798	12.526 s	12.526 s	

Obr. 38: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, profiler, 1-thread CPU (Zdroj: vlastní zpracování, MATLAB profiler)

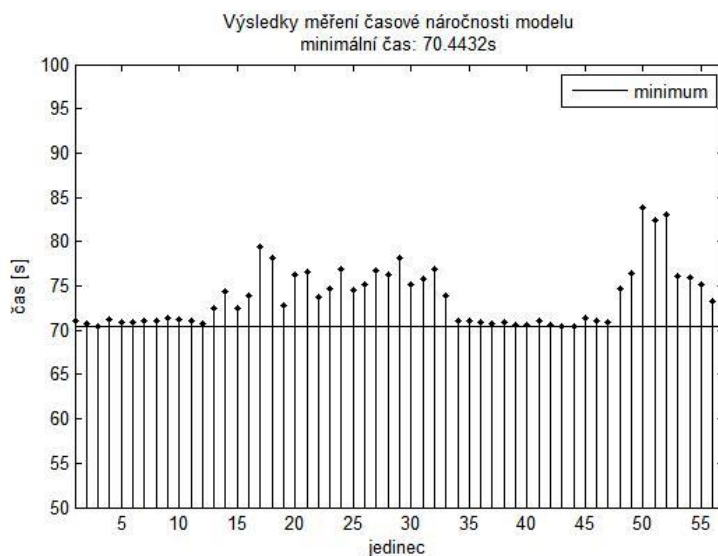
Z uvedené analýzy plyne, že jestliže chceme zrychlit výpočet účelové funkce jako celku, musíme především zrychlit výpočet funkce `distDiminish()`, přičemž nutnost zrychlit výpočet účelové funkce začala být zřejmá již ve chvíli, kdy začaly experimenty s optimalizačními funkcemi. Tehdy totiž vznikla potřeba mnohonásobného ohodnocování účelové funkce, což při jednovláknovém zpracování kladlo nesmírné nároky na výpočetní čas.

### 9.5.1 Paralelizace na CPU

V MATLABu lze paralelizovat výpočty na CPU pomocí virtuálních strojů (workerů), které v ideálním nastavení využívají každý právě jedno fyzické jádro procesoru, což pro případ autora PC představuje 4 virtuální stroje. V případě tohoto typu paralelizace tedy budeme hovořit o 4-thread CPU paralelizaci, oproti 1-thread CPU výpočetnímu módu, kdy o paralelizaci pochopitelně hovořit nelze.

Ne každá funkce je vhodná k paralelizaci. Zejména nelze použít paralelizaci tam, kde je nutná rekurzivní závislost, nebo obecně kdekoliv, kde potřebujeme využívat komplikovanější indexaci. Spousta konstrukcí může používat indexaci i tam, kde není nezbytná, ale je přehlednější a lépe debugovatelná. V některých případech, a v MATLABu toto platí zejména, je použití indexace dokonce rychlejší než alternativní postup. Jako příklad uveďme použití indexace namísto funkce `find()`. V celém optimalizačním modelu je velmi často nutné prohledávat rozsáhlá pole a vybírat z nich hodnoty splňující určité podmínky. K tomu je velmi vhodná logická indexace, kterou ovšem můžeme paralelizovat jen za určitých okolností.

Z předchozí kapitoly je zřejmé, že paralelizovat by se měla především funkce `distDiminish()`, k čemuž bylo přistoupeno. Její paralelizace se však neobešla bez úprav v indexaci. Ty byly nicméně v rámci funkce `assignDemand()` implementovány současně i pro 1-thread CPU, což je důvod, proč je funkce ve statistice z obr. 38 volána tolikrát. Zobrazení výsledků má analogický princip jako v případě 1-thread CPU, nyní si však vystačíme pouze s grafem a výstupem profileru. Na obr. 39 a obr. 40 vidíme tyto statistiky.



Obr. 39: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, tic měření, 4-thread CPU (Zdroj: vlastní zpracování, pomocí `computingStatistics4CPU.m`)

Na první pohled je patrné, že paralelizací funkce `distDiminish()` na 4 procesorových jádrech dochází k výraznému zrychlení celého výpočtu. Původní výpočetní čas měřený první metodou se snížil ze 136 na 70 sekund, což je téměř dvojnásobné zrychlení. Použití 4 CPU jader namísto jednoho by implikovalo čtyřnásobné zrychlení. K tomu však nedochází ani v nejdělnějších případech, k plnému čtyřnásobnému zrychlení by dokonce nemohlo dojít ani teoreticky, neboť je nutné rezervovat jistý výpočetní výkon na řízení jednotlivých virtuálních pracovních stanic. V našem případě není paralelizace navíc použita na celou účelovou funkci, ale jen na její část. Zrychlení lze očekávat jen od této části, výsledný zrychlující efekt na účelovou funkci je tak zeslaben.



Porovnáme-li výstupy druhého typu měření, pak vidíme, že ze statistiky zmizela funkce `distDiminish()`, která byla nahrazena Java metodou `LinkedBlockingQueue`. Její uvedený čas odpovídá na otázku, jak dlouho na sebe celkem jednotlivé virtuální stroje vzájemně čekaly, než poslední z nich dokončil jeden paralelní for cyklus, tzn. jeden výpočet kompletní matice vzdáleností. Toto je hodnota označitelná  $D_{4CPU}$  a přímo porovnatelná s  $D_{1CPU}$ . Její numerickou hodnotu dostaneme výpočtem jako v předchozí kapitole:  $D_{4CPU} = \frac{2626}{57} \cong 46,07$  s. Nyní vidíme že oproti  $D_{1CPU}$  se hodnota  $D_{4CPU}$  zvýšila přibližně  $\frac{100,51}{46,07} = 2,18$  krát. Jak jsme očekávali, jde o mírně vyšší zvýšení než u výpočetního času celé účelové funkce. Ten byl paralelizací zlepšen na  $Z_{4CPU} = \frac{4269}{57} \cong 74,89$  s, což je přibližně  $\frac{152,32}{74,89} = 2,03$ -násobné zrychlení.

**Profile Summary**  
Generated 30-Aug-2017 19:15:02 using cpu time.

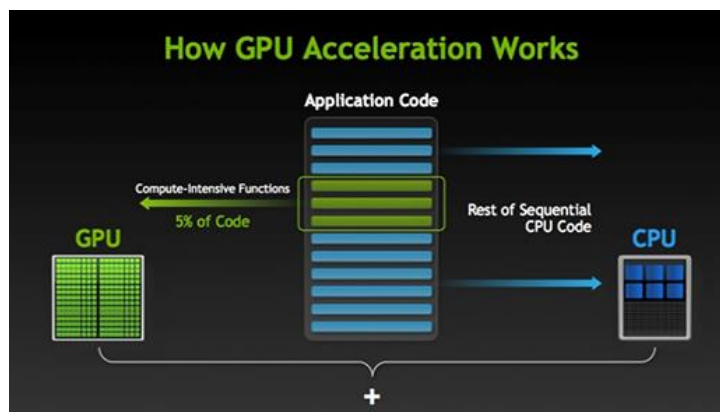
Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
<a href="#">GAnormalSolver</a>	1	4269.011 s	0.123 s	
<a href="#">mainObjectiveFunction</a>	57	4268.883 s	2.151 s	
<a href="#">queueModel</a>	57	4204.246 s	107.609 s	
<a href="#">assignDemand</a>	57	3656.949 s	302.715 s	
<a href="#">parallel_function</a>	57	2667.666 s	0.050 s	
<a href="#">parallel_function&gt;distributed_execution</a>	57	2664.787 s	5.833 s	
<a href="#">...omp_remoteparfor.getCompleteIntervals</a>	570	2637.983 s	3.070 s	
<a href="#">java.util.concurrent.LinkedBlockingQueue</a> (Java method)	3244	2626.085 s	2626.085 s	
<a href="#">demand2meshgrid</a>	57	509.085 s	445.637 s	
<a href="#">SOCgenerator</a>	5187	199.683 s	165.159 s	
<a href="#">nansum</a>	17442	179.362 s	179.362 s	
<a href="#">stationSimulator</a>	788424	145.083 s	82.332 s	
<a href="#">getCRborder</a>	114	116.024 s	3.782 s	
<a href="#">f_philamH_wqs_to_XYH_jtsk</a>	649914	108.575 s	96.280 s	
<a href="#">sortrows</a>	1062400	66.012 s	31.701 s	
<a href="#">fullRepublicCoverTest</a>	57	60.541 s	2.498 s	
<a href="#">SOCfunction</a>	274904	34.524 s	34.524 s	
<a href="#">sortrows&gt;sort_back_to_front</a>	1062229	34.311 s	34.311 s	
<a href="#">generateArrivals</a>	5187	31.026 s	4.810 s	
<a href="#">carArrivalGenerator</a>	788424	26.216 s	9.651 s	

Obr. 40: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, profiler, 4-thread CPU  
(Zdroj: vlastní zpracování, MATLAB profiler)

Dvojnásobné zrychlení je každopádně velmi slušný výsledek, z něhož plyne snížení nároků na rychlost konvergence optimalizačního algoritmu. Poznamenejme, že většina práce na optimalizačním modelu, resp. optimalizačním solveru byla zpracovávána ještě pomocí 4-thread CPU přístupu. Až později se autor pokusil využít plného potenciálu výpočetního PC, konkrétně jeho dedikované grafické karty, pro ještě vyšší zrychlení celého výpočtu. Jak ukazuje následující kapitola, toto opatření se vyplatilo.

## 9.5.2 Paralelizace na GPU

Pomocí MATLABu je rovněž možné provádět výpočty na výpočetních jádrech grafického čipu. Tato možnost je v moderních aplikacích stále častěji používána zejména proto, že GPU mají oproti CPU neporovnatelně vyšší výpočetní výkon, což je dáno jejich počtem jader. Ty sice běží na nižších frekvencích než jádra CPU, ale v aplikacích, kde se provádí velké množství triviálních maticových operací, mají jednoznačný prim v celkové rychlosti výpočtu. Možnosti algoritmických konstrukcí vhodných k paralelizaci na GPU jsou však bohužel ještě omezenější než v případě paralelizace na CPU. Platí pro ně stejná omezení jako v případě paralelizace na CPU a k tomu se přidávají omezení plynoucí z možností interního kompilátoru MATLABu, který překládá zabudované funkce MATLABu do příkazů srozumitelných pro grafickou kartu. Velmi výstižně vysvětluje výhody paralelního computingu webová stránka výrobce grafických karet Nvidia [216], odkud pochází jednoduché schéma z obr. 41.



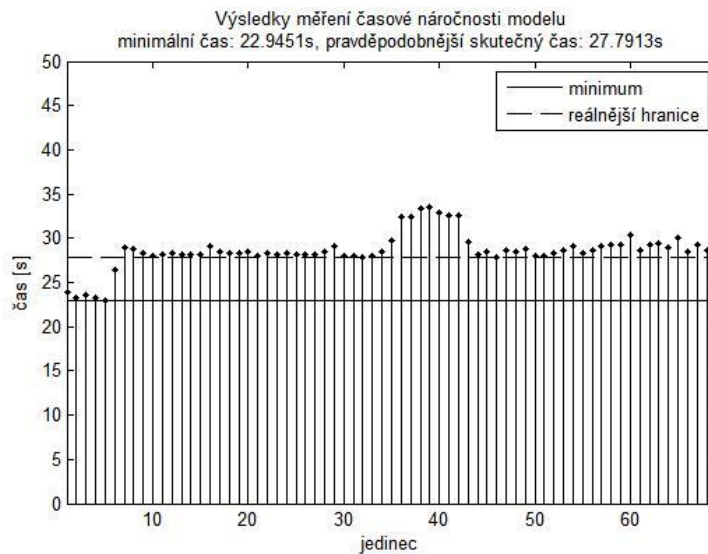
Obr. 41: Použití výkonu grafické karty v běžných programech  
(Zdroj: [216])

Jestliže běžný, sekvenčně zpracovávaný program obsahuje části náročné na výpočetní výkon, lze tyto části odeslat na GPU. Tam jsou paralelně zpracovány na stovkách až tisících výpočetních jader karty (záleží na modelu karty) a výsledek je vrácen CPU k pokračování v sekvenčním běhu programu. Takto se dají paralelizovat různé části kódu, nicméně největší efekt přináší paralelizace souvislých celků. Pokud bychom totiž chtěli paralelizovat více samostatných, méně náročných částí, pak by celkový výpočet mohl trvat ještě déle než bez použití paralelizace a to z toho důvodu, že přenos dat z běžné operační paměti do grafické operační paměti je časově relativně náročný.

V našem případě by tedy bylo ideální odeslat celé pole velikosti 4,5 GB a nechat GPU provést na něm výpočty. Zde ovšem znovu narážíme na problém velikosti grafické operační paměti. Grafická karta má k dispozici dokonce ještě méně operační paměti než samotné PC, konkrétně 2 GB. Navíc, karta musí svou dostupnou grafickou operační paměť rozdělit mezi vstupní a výstupní pole a další omezení říká, že GPU (respektive kompilátor MATLABu s ním komunikující) přijímá jako vstupy pouze pole stejné velikosti, případně skaláry; analogicky výstupy musí být pole stejné velikosti jako vstupy. To prakticky znamená, že všechny vstupní i výstupní datová pole musí mít stejnou

velikost, přičemž celková velikost všech těchto polí nesmí přesáhnout dostupné 2 GB grafické operační paměti.

I když jsou uvedena omezení poměrně striktní, řešením se ukázalo být přepsání funkce měření vzdáleností do podoby rekurzivní funkce. GPU jsou předloženy matice souřadnic meshe a v iteracích  $i = 1, \dots, n$  je volána funkce `GPUgeodeticDistance()` tvořící matici vzdáleností mezi  $i$ -tou stanicí a všemi body meshe, čímž je postupně tvořena požadovaná matice nejbližších vzdáleností. Z obr. 42 jasně vidíme další zrychlení oproti 4-thread CPU. Jako skutečný čas zde máme dva kandidáty. Pravděpodobnější z nich se jeví ten delší, přibližně 28 sekund na jeden výpočet matice vzdáleností.



Obr. 42: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, tic měření, GPU  
(Zdroj: vlastní zpracování, pomocí `computingStatisticsGPU.m`)

Z profileru vidíme rovněž jednoznačné zrychlení výpočtu funkce `distDiminish()`, tato funkce se nově vypočte dokonce rychleji, než další součást `assignDemand()`, totiž `demand2meshgrid()`. I nyní můžeme stanovit hodnoty  $D_{GPU} = \frac{349}{69} \cong 5,06 \text{ s}$  a  $Z_{GPU} = \frac{2053}{69} \cong 29,75 \text{ s}$ . Znamená to tedy, že výpočtem na GPU dochází k dramatickému,  $\frac{46,07}{5,06} = 9,10$ -násobnému zrychlení výpočtu `distDiminish()` oproti 4-thread CPU paralelizaci. To má v menší míře dopad na rychlost výpočtu účelové funkce, kterou GPU paralelizace zrychluje  $\frac{74,89}{29,75} = 2,52$ -krát oproti 4-thread CPU paralelizaci. Je patrné, že samotná GPU paralelizace má výrazný přínos pro tu část kódu, na kterou je aplikována. Z globálního hlediska však potřebujeme zrychlit výpočet účelové funkce jako celku. Provedená analýza výpočetních časů naznačuje, že zrychlování funkce `distDiminish()` naráží na své hranice a další optimalizací tohoto úseku kódu by nebylo dosaženo výrazného zrychlení účelové funkce. Tímto konstatováním úvahy o paralelizaci funkce `distDiminish()` končí a tab. 10 shrnuje její výsledky.

### Profile Summary

Generated 30-Aug-2017 20:39:21 using cpu time.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
<a href="#">GAnormalSolver</a>	1	2053.875 s	0.122 s	
<a href="#">mainObjectiveFunction</a>	69	2053.744 s	2.398 s	
<a href="#">queueModel</a>	69	1974.839 s	122.929 s	
<a href="#">assignDemand</a>	69	1567.828 s	380.350 s	
<a href="#">demand2meshgrid</a>	69	617.244 s	539.585 s	
<a href="#">distDiminish</a>	69	348.614 s	343.044 s	
<a href="#">nansum</a>	21114	222.958 s	222.958 s	
<a href="#">stationSimulator</a>	954408	151.873 s	86.175 s	
<a href="#">getCRborder</a>	138	142.449 s	4.037 s	
<a href="#">f_philamH_wgs_to_XYH_itsk</a>	786738	134.118 s	119.422 s	
<a href="#">fullRepublicCoverTest</a>	69	74.091 s	2.771 s	
<a href="#">sortrows</a>	1285080	68.473 s	32.928 s	
<a href="#">generateArrivals</a>	6279	37.925 s	6.084 s	
<a href="#">sortrows&gt;sort_back_to_front</a>	1284873	35.545 s	35.545 s	
<a href="#">carArrivalGenerator</a>	954408	31.841 s	11.704 s	
<a href="#">SOCgenerator</a>	6279	25.195 s	12.831 s	
<a href="#">customRNG</a>	966966	20.137 s	20.137 s	

Obr. 43 Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, profiler, GPU  
(Zdroj: vlastní zpracování, MATLAB profiler)

Z obr. 43 vidíme relativní nárůst významnosti funkce `demand2meshgrid()` na celkový výpočetní čas účelové funkce. Můžeme se tedy ptát, jak tento význam rostl vůči funkci `distDiminish()` při různých stupních paralelizace. Tuto odpověď poskytují poslední tři sloupce tab. 10. Z nich vidíme, že při GPU paralelizaci zabere funkce `demand2meshgrid()` přibližně 30 % celkového času účelové funkce, kdežto `distDiminish()` již jen 17 %. Dalším logickým krokem by tedy bylo zaměřit se na možnosti zrychlení funkce `demand2meshgrid()`, které ovšem už nemohou vycházet z paralelizace, ale musely by být předmětem detailního rozboru výstupu profileru. Tuto analýzu prozatím neuvažujeme a ponechme tento problém jako předmět budoucího výzkumu (viz kap. 10.3).

Tab. 10: Souhrn přínosů paralelizace funkce `distDiminish()`

typ výpočtu ( $X$ )	$D_X$ [s]	Koeficient zrychlení $D_X$	$Z_X$ [s]	Koeficient zrychlení $Z_X$	$M_X$ [s]	$\frac{D_X}{Z_X}$ [%]	$\frac{M_X}{Z_X}$ [%]
1-thread CPU	100,51	1	152,32	1	10,82	65,99	7,10
4-thread CPU	46,07	2,18	74,89	2,03	8,93	61,52	11,92
GPU	5,06	19,86	29,75	5,12	8,95	17,01	30,08

(Zdroj: vlastní zpracování, pomocí `computingStatisticsCPU`, `computingStatistics4CPU` a `computingStatisticsGPU`)

## 10 Optimalizační metody

Jakmile je optimalizační model z předchozí kapitoly formulován, je na řadě přistoupit k jeho řešení. Řešením optimalizačního modelu je myšleno zjištění hodnot vstupních proměnných a odpovídající hodnoty účelové funkce, které budou moci být z hlediska optimalizačních kritérií označeny jako optimální. Proces zjištění těchto hodnot není triviální a nazýváme ho optimalizační metodou. Níže popsaná optimalizační metoda je tedy navrženým procesem, jak získat optimální hodnoty optimalizačního modelu.

### 10.1 Náhodné prohledávání

Základ optimalizačního solveru byl vyvíjen na metodě náhodného prohledávání prostoru proměnných. Je proto vhodné úvodem začít právě s ní a stručně zmínit její princip, jakkoliv je triviální. Algoritmus náhodného prohledávání nebyl implementován samostatně. Byl vyvíjen a používán jako kostra budoucího genetického algoritmu, nebyly v něm ovšem implementovány žádné genetické operace, tedy selekce, křížení, ani mutace. V této fázi algoritmus fungoval tak, že pro každého jedince z populace byl vygenerován jeho náhodný genotyp, ten byl přeložen do fenotypu a tento zcela neupravený, stále náhodný fenotyp byl ohodnocen účelovou funkcí. Po ohodnocení populace byl ponechán jedinec s nejlepší hodnotou účelové funkce a všichni ostatní byli smazáni. Tento proces byl prováděn v každé iteraci solveru, neexistovala tedy spojitost mezi dvěma po sobě jdoucími iteracemi, proces prohledávání prostoru proměnných (prostoru genotypu) byl náhodný. Takto nastavený optimalizační solver se zastavil v momentě, kdy nejlepší jedinec po stanovený počet iterací neměnil svoji vedoucí pozici. Alternativní a pravděpodobně tradičnější interpretace je: algoritmus se zastavil poté, co se po určitý počet iterací neměnila (nezlepšovala) hodnota účelové funkce.

Používání pojmů jako genotyp a fenotyp v souvislosti s algoritmem náhodného prohledávání se může čtenáři jevit poněkud zvláštní. Jednotlivé pojmy budou vysvětleny v následující kapitole již plně věnované kompletně funkčnímu genetickému solveru, který je implementací navržené optimalizační metody – genetického algoritmu.

### 10.2 Genetický algoritmus

V této kapitole je představen nově navržený optimalizační algoritmus (nazvaný jednoduše CGA – custom genetic algorithm), jakožto vlastní implementace základních myšlenek genetického algoritmu. Jde tedy v zásadě o rozšíření optimalizačního solveru o schopnost pracovat s populací jedinců, zejména provádět na ní tři základní genetické operace – selekci, křížení a mutaci. Tato kapitola pojednává o návrhu a implementaci jednotlivých částí CGA. Za algoritmus jako takový lze považovat optimalizační solver, tedy funkci

```
[bestFval, bestFvalHistory, bestStations, fullPopFval] =  
GAnormalSolver(objFcn, optOptions)
```

Jejím vstupem je účelová funkce `objFcn` z kapitoly 9.4 a volitelná množina nastavení `optOptions`. Volitelná proto, že pokud není specifikována, pak jsou řídicí parametry nastaveny na své defaultní hodnoty v hlavičce funkce. Výstupem funkce jsou statistiky optimalizace, tedy finální hodnota účelové funkce `bestFval`, hodnoty účelové funkce v jednotlivých generacích `bestFvalHistory`, nalezené nejlepší řešení, tedy množina stanic `bestStations`, ke které se vztahuje hodnota `bestFval`, a nakonec hodnoty účelové funkce všech jedinců z populace, nejen toho nejlepšího. V těle funkce jsou pak volány jednotlivé části CGA. Těmi se zabývají následující podkapitoly.

Smysl řídicích parametrů algoritmu je popsán v tab. 11.

Tab. 11: Popis řídicích parametrů CGA

Název	Popis	Výchozí hodnota
<code>popSize</code>	Počet jedinců v jedné generaci populace.	5
<code>maxNum</code>	Maximální počet stanic v jednom jedinci.	3
<code>maxCon</code>	Maximální počet různých typů připojení na stanici.	4
<code>maxQ</code>	Maximální násobnost určitého typu připojení.	2
<code>maxStallGen</code>	Kritérium zastavení. Počet po sobě jdoucích generací, po které se hodnota účelové funkce nemění.	10
<code>rmax</code>	Kritérium poloměru service area z kapitoly 6.2.2.	22
<code>timeSpan</code>	Časové období.	(2017.25, 2017.50)

(Zdroj: vlastní zpracování)

### 10.2.1 Řídicí parametry a představení populace

Podobně jako algoritmus náhodného prohledávání, i CGA musí začínat vygenerováním populace jedinců. Než přejdeme k popisu generátoru populace, definujme, co chápeme pod pojmy jedinec a populace jedinců. Jedinec je chápán jako množina nabíjecích stanic umístěných na území ČR, přičemž každá stanice má určité technické parametry. U jedince rozlišujeme jeho *genotyp* a *fenotyp*. Jedná se o pojmy z prostředí reprodukční biologie, které byly převzaty oborem umělé inteligence k popisu rozdílu mezi různými reprezentacemi jedince. Genotyp je souhrn dat definující daného jedince, fenotyp je vyjádřením těchto dat, tedy reálným zosobněním daného jedince. Princip umělé genetické reprodukce spočívá v tom, že genotyp jedince je transformován (křížen, mutován) s genotypy ostatních jedinců v populaci, čímž potenciálně vytváří nové jedince, v populaci se dříve nevyskytující. Běžně se hovoří o těchto nových jedincích jako o potomcích původních jedinců, přičemž původní jedinci jsou označováni jako rodiče potomků. Zde prozatím není třeba zabíhat do detailů, nicméně podotkneme, že během procesu genetické transformace nemusí vždy dojít k reprodukci, tedy k tvorbě nových potomků. Proto výše hovoříme o pouze potenciálně nových jedincích.

Jedince nevytváříme bezúčelně. Při použití v optimalizačním algoritmu představují jedinci vstupy účelové funkce, přičemž nás zajímá nalézt takové vstupy, které budou z hlediska hodnoty účelové funkce optimální. Pro množinu optimálních vstupů musí platit, že neexistuje jiná množina vstupů, pro kterou by byla hodnota účelové funkce lepší ve smyslu směru optimalizace. Z toho plyne, že abychom získali hodnotu účelové funkce

pro daného jedince, musíme tohoto jedince mít, tj. musíme mít k dispozici fenotyp tohoto jedince. Ten získáme z jeho genotypu, jeho vyjádřením, resp. *přeložením* na fenotyp.

Tab. 12: Příklad genotypu populace

Parametry genotypu	popSize = 5					
	maxNum = 3	maxCon = 4	maxQ = 2			
	maxStallGen = 10					
	Lattitude	Longitude	Power	Q		
	<0; 1000>	<0; 1000>	<0; 1000>	<0; maxQ>		
Genotyp	Jedinec	Stanice	Parametry konektoru			
	popSize	<0; maxNum>	<1; maxCon>			
			Lattitude	Longitude	Power	Q
#1	#1.1		830,5338	321,2223	664,7841	2
			830,5338	321,2223	970,8369	1
			830,5338	321,2223	23,4382	1
			830,5338	321,2223	700,4939	2
	#1.2		888,6862	772,2767	634,0215	1
			#1.3		106,9024	82,1657
			106,9024		82,1657	873,0202
	#2	#2.1		426,8586	200,3929	194,1435
426,8586				200,3929	68,4252	2
...	...	...	...	...	...	
#5	#5.1		439,4429	86,7592	25,4445	2
			439,4429	86,7592	404,7774	2
			439,4429	86,7592	56,6383	2
	#5.2		114,2314	789,1907	168,5488	2

(Zdroj: vlastní zpracování, podle `getRandomGenotype()`)

Tab. 13: Příklad fenotypu populace (odpovídá genotypu z tab. 12)

Fenotyp	Jedinec	Stanice	Parametry konektoru			
			Lattitude	Longitude	Power	Q
			<48,540841; 51,054381>	<12,085860; 18,862533>	viz kap. 10.2.4	jako v genotypu
#1	#1.1		50,6284	14,2626	33920	2
			50,6284	14,2626	200000	1
			50,6284	14,2626	920	1
			50,6284	14,2626	35328	2
	#1.2		50,7745	17,3193	32000	1
	#1.3		48,8095	12,6426	3200	2
48,8095			12,6426	80000	1	
#2	#2.1		49,6137	13,4438	5120	1
			49,6137	13,4438	2944	2
...	...	...	...	...	...	
#5	#5.1		49,6453	12,6737	920	2
			49,6453	12,6737	15360	2
			49,6453	12,6737	2560	2
	#5.2		48,8279	17,4339	3680	2

(Zdroj: vlastní zpracování, podle `genotype2phenotype()`)

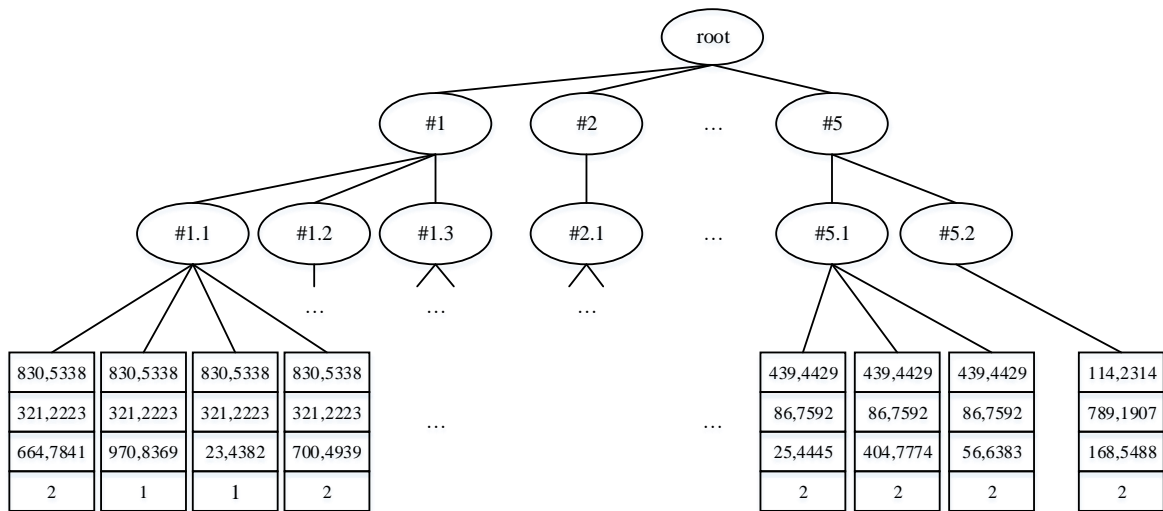
V tab. 12 resp. tab. 13 je příklad genotypu, resp. jemu odpovídajícího fenotypu. Již na první pohled je patrné, že obě dvě reprezentace jedince jsou si navzájem velice podobné. Tato vlastnost není pravidlem, naopak. V biologii nemá genotyp s fenotypem ze strukturálního nebo vizuálního hlediska příliš společného. V oboru umělé inteligence se však pracuje s abstraktními entitami, které jsou na výpočetní technice reprezentovány čísly. Tato čísla tak mohou být zároveň genotypem, tj. nositelem genetické informace o unikátnosti jedince, a současně fenotypem, tj. skutečnou finální reprezentací jedince. Podobnost genotypu s fenotypem proto není v uvedeném případě ničím neobvyklým.

Přesto by se dalo namítnout, že konvence tvorby genetických algoritmů a jejich hybridů diktuje, že by genotyp měl být reprezentován řetězcem znaků (celých čísel, písmen abecedy apod.), případně vektorem reálných čísel určité délky. Tento řetězec či vektor je pak v procesu genové exprese přeložen do formátu majícího finální tvar a strukturu, tedy do fenotypu. V takovém případě jsou sice genotyp a fenotyp strukturálně i vizuálně odlišné, ale za cenu toho, že logika genové exprese musí obsahovat rovněž logiku strukturálního překladu z vektoru hodnot na specifickou strukturu jednotlivce. Jde o proces, kdy algoritmus musí vektor hodnot parsovat, tj. strukturálně analyzovat a určit z něj, jakou nosnou strukturu (podobu) má překládanému jedinci vytvořit. Jelikož by tato funkcionalita byla poměrně náročná na implementaci, bylo rozhodnuto, že genotyp jedince v sobě ponese strukturu jedince explicitně, tzn. že potřebná větvení a zanoření bude explicitně obsahovat již genotyp. Tento princip na vysvětlen na příkladech z obr. 44 až obr. 46.

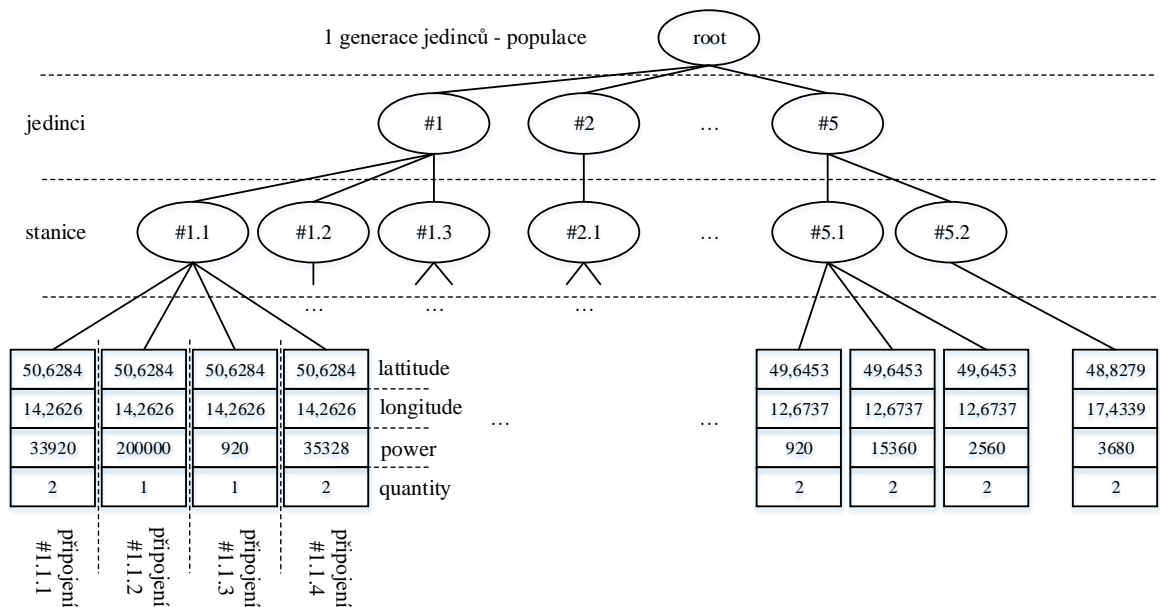
...	830,5338	321,2223	664,7841	2	830,5338	321,2223	970,8369	1	...	
...	830,5338	321,2223	23,4382	1	830,5338	321,2223	700,4939	2	...	
...	888,6862	772,2767	634,0215	1	106,9024	82,1657	133,0675	2	...	
...	106,9024	82,1657	873,0202	1	426,8586	200,3929	194,1435	1	...	
...	426,8586	200,3929	68,4252	2	...	...	...	...	...	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
...	...	...	...	...	...	439,4429	86,7592	25,4445	2	...
...	439,4429	86,7592	404,7774	2	439,4429	86,7592	56,6383	2	...	
...	114,2314	789,1907	168,5488	2	...	...	...	...	...	

Obr. 44: Příklad genotypu – standardní lineární tvar s vyznačenými body parsování jedinců (červeně) a stanic (modře)  
(Zdroj: vlastní zpracování)





Obr. 45: Příklad genotypu – stromová reprezentace navržené struktury genotypu populace  
(Zdroj: vlastní zpracování)



Obr. 46: Příklad fenotypu – stromová reprezentace reálné podoby populace  
(Zdroj: vlastní zpracování)

Na obr. 44 je znázorněn vektor reprezentující genotyp populace – jedné generace jedinců. Tento způsob reprezentace je běžný v konvenční implementaci GA. Tam jsou nicméně jedinci populace strukturálně homogenní, tj. každého jedince reprezentuje daný počet čísel, který je u všech jedinců totožný. Vzájemná rozdílnost jedinců plyne pouze z různých hodnot těchto jejich čísel. To způsobuje, že celou populaci jedinců je možné uložit do jediné matice, kde každý řádek matice reprezentuje genotyp jednoho člena populace. Povaha vstupních proměnných optimalizačního modelu, tj. populace CGA, je ovšem navržena tak, že počet jedinců je sice konstantní, ale jednotliví jedinci mohou mít různou délku, kterou mohou navíc při běhu algoritmu měnit. Velikost genotypu populace (počet reálných čísel potřebných k reprezentaci jedince) leží v intervalu  $R(P)$  z rov. 32

ohrazeném zdola nulou a shora násobkem řídicích parametrů  $P$  a čísla 4 udávajícím počet technických parametrů jediného připojení stanice. V jednotlivých iteracích sice zůstává počet jedinců stejný, jedinci ovšem mění nejen svoje hodnoty, ale i svou strukturu, tj. délku. Pro konkrétní hodnoty řídicích parametrů z uvedeného příkladu se velikost populace bude pohybovat v intervalu  $R(X)$  z rov. 33. Aktuální délka genotypu  $L$ , tj. konkrétní velikost genotypu populace v dané iteraci, je potom dána vztahem z rov. 34, kde  $n_i$  je aktuálně platný počet stanic pro  $i$ -tého jedince a  $m_{ij}$  je počet různých připojení pro  $j$ -tou stanici z  $i$ -tého jedince.

$$P = \{\text{popSize}, \text{maxNum}, \text{maxCon}\}$$

$$R(P) = \langle 0; 4 \prod_{p \in P} p \rangle \quad \text{Rov. 32}$$

$$X = \left\{ \begin{array}{l} \text{popSize} = 5, \\ \text{maxNum} = \langle 0; 3 \rangle, \\ \text{maxCon} = \langle 1; 4 \rangle \end{array} \right\} \quad \text{Rov. 33}$$

$$R(X) = \langle 0; 240 \rangle$$

$$L = \sum_{i=1}^{\text{popSize}} \sum_{j=0}^{n_i} 4m_{ij} \quad \text{Rov. 34}$$

$$n_i \in \langle 0; \text{maxNum} \rangle$$

$$m_{ij} \in \langle 1; \text{maxCon} \rangle$$

Proměnlivost velikosti genotypu jedince, resp. populace tedy způsobuje, že tradiční formát ukládání genetické informace ve vektoru či matici není pro navržený algoritmus vhodný. Mnohem vhodnější je použití některého ze strukturovaných datových typů MATLABu, jakými jsou `struct` nebo `cell array`. Oba typy umožňují strukturovat data od podoby stromu jako na obr. 45 a obr. 46, rozdíl je pouze v tom, že datový typ `struct` umožňuje jednotlivé větve pojmenovávat, a tím udržovat přehlednost v rozsáhlých stromech. Náš strom populace je malý a formát jeho struktur daný. To umožňuje bezpečné použití datového typu `cell array`, který nám dovoluje používat kratší syntaxi při odkazování.

Z uvedených příkladů je zřejmé, že jednotlivá připojení s různým výkonem na jedné nabíjecí stanici jsou v genotypu uvedena duplicitně. Bylo by tedy možné tuto informaci přiřadit přímo nabíjecí stanici, čímž by byly odstraněny duplicitní záznamy, délka genotypu jedince by se zkrátila, což by zkrátilo i celý genotyp populace. Takové opatření by sice zkrátilo počet čísel potřebných k zakódování jedince, pro potřeby účelové funkce je však vhodnější mít k dispozici explicitní informace o poloze, výkonu a počtu každého z různých nabíjecích připojení. Pokud by listy stromu reprezentující různá nabíjecí připojení obsahovaly pouze informace o výkonu a počtu totožných připojení, pak by bylo stejně nutné přiřadit k této informaci ještě informaci o poloze daného připojení. Nemá proto smysl ukládat tuto informaci zvlášť v nadřazené úrovni. Úspora místa není natolik zásadní. Bylo by přirozeně možné upravit zpětně účelovou funkci tak, aby jí tento

paměťově úspornější formát vyhovoval. Z praktického hlediska však náklady takového opatření (zejm. časové) daleko převyšují jeho přínosy.

Ukládání genotypu do formátu stromu namísto lineárního formátu má navíc ještě další výhodu. V následující kapitole bude popisován generátor populace. Ten buď musí jedince tvořit náhodně, přičemž je následně testuje, zda nejsou patologičtí, nebo je navržen jako konzistentní (uzavřený), tedy generuje pouze přípustné (nepatologické) jedince. Reprezentace genotypu pomocí stromu umožňuje, že potenciální strukturální, či hodnotová patologičnost může být odhalena již v procesu generování genotypu, popř. v procesu genetické reprodukce. Strukturální patologičností je míněna velikost jedince mimo stanovené meze, hodnotovou patologičností jsou myšleny parametry (hodnoty) jedince mimo stanovené meze. Tím, že generátor je nucen již v genotypu vytvářet strukturu totožnou s finální strukturou jedince, je zajištěno, že finální fenotyp (skutečný jedinec) nebude patologický.

### 10.2.2 Generátor populace

Tvorbu genotypu nového jedince zajišťuje funkce `getRandomGenotype()`.

```
genotype = getRandomGenotype(maxNum, maxCon, maxQ, bordLat, bordLon)
```

Funkce generuje nový náhodný genotyp jednoho jedince ze zadaných řídicích parametrů, které fungují jako omezení pro velikost jedince. Pro vygenerování genotypu celé jedné populace je tedy nutné funkci volat *popSize*-krát. Funkce samotná funguje velmi prostě. Funkce nejprve vygeneruje skutečný počet stanic pro daného jedince. Toto číslo, označme jej *n*, je náhodné a spadá do intervalu  $\langle 0; \text{maxNum} \rangle$ . Pokud  $n = 0$ , pak to znamená, že aktuálně vytvářený jedinec nebude obsahovat žádnou stanici. Takový jedinec pak reprezentuje případ, kdy do existující sítě stanic není algoritmem přidávána žádná nová stanice a účelová funkce je počítána pouze pro existující soubor stanic. Pokud ovšem  $n > 0$ , pak se *n*-krát vytvoří dvojice hodnot, každá z intervalu  $\langle 0; 1000 \rangle$ , které reprezentují zeměpisné souřadnice. Vygenerované souřadnice se nejprve testují, zda jsou uvnitř hranic ČR. Za tím účelem se v rámci funkce `isInsideCRborder()` část genotypu zodpovědná za souřadnice přeloží na fenotyp a otestuje se, zda daný zeměpisný bod je uvnitř polygonu hranic ČR. Zároveň se *n*-krát vygeneruje náhodné číslo *c* reprezentující počet různých připojení u aktuálně vytvářené stanice. Hodnota čísla *c* je z intervalu  $\langle 1; \text{maxCon} \rangle$ . Ještě v témže cyklu se *c*-krát vytvoří další dvojice hodnot, první reprezentuje výkon daného konektoru v rámci konkrétní nabíjecí stanice a rozah tohoto parametru je podobně jako v případě zeměpisných souřadnic z intervalu  $\langle 0; 1000 \rangle$ . Druhé číslo pak reprezentuje násobnost jednotlivých různých připojení, tzn. počet totožných připojení určitého druhu. Číslo reprezentující násobnost je na rozdíl od tří předchozích definováno jako celé číslo z intervalu  $\langle 1; \text{maxQ} \rangle$ .

Výstupem funkce `getRandomGenotype()` je tedy datová struktura popsaná v kapitole 10.2.1 reprezentující jednoho jedince, který s ostatními tvoří genotyp celé populace. Proces vytvoření kompletní nové, náhodné populace je v každém běhu solveru proveden pouze jednou – na samotném počátku, v 1. iteraci, takže vytvořená populace odpovídá

první generaci jedinců. Všechny ostatní generace nepotřebují vytvářet celou novou generaci, jedinci nových generací jsou vytvářeni pomocí reprodukčního procesu popsaného níže jako potomci existujících jedinců. Může ovšem nastat případ, že se v populaci v průběhu reprodukčního procesu začnou objevovat jedinci s patologickými znaky. V takovém případě by bylo nutné patologického jedince odstranit a nahradit ho novým, nově vygenerovaným. Reprodukční proces bude sice navržen podobně jako generátor nových jedinců konzistentní, tedy uzavřený z hlediska přípustných hodnot, nicméně existuje ještě jedna situace, kdy je potřeba injektovat do populace nové jedince.

I když reprodukční proces negeneruje patologické jedince, mohou vznikat jedinci degenerovaní. Degenerovaný jedinec je obtížně charakterizuje z obecného hlediska, nejjasněji ho lze charakterizovat v souvislosti s pojmem degenerované, popř. degenerující populace. Populace je degenerovaná, jestliže reprodukční proces v ní probíhající vytvořil jedince totožné, nebo velmi podobné a současně není schopen se jich zbavit v rozumném výpočetním čase. V takové situaci nelze tvrdit, že by jedinec byl degenerovaný sám o sobě, je degenerovaný ve vztahu k ostatním, k celé populaci a k reprodukčnímu procesu. Ten samý jedinec nebude označen jako degenerovaný, jestliže se bude objevovat v populaci samostatně, popř. bude aktivním účastníkem reprodukčního procesu. Alternativně lze chápat degeneraci jako neschopnost jedince vnést do populace genetickou informaci, která by vedla k pozitivnímu kvalitativnímu posunu směrem k hledanému optimu účelové funkce, přičemž opět musí platit, že jedinec v populaci přetrvává po mnoho generací beze změny. Tato vlastnost se však velmi těžko odhaluje, a navíc pro ni platí jedna zásadní výjimka, a tou je jedinec reprezentující optimum. Ten pochopitelně splňuje výše uvedené podmínky, ale nelze o něm tvrdit, že trpí degenerací, naopak, tyto jeho vlastnosti jsou znakem jeho výsadního postavení v populaci.

V předkládaném návrhu genetického algoritmu, resp. v návrhu jím používaného formátu genotypu existuje jedna výjimka, kterou lze označit za degenerovanou samu o sobě, nicméně za záměrnou a v jisté situaci žádoucí. Jde o prázdného jedince neobsahujícího žádné nabíjecí stanice, který vzniká při  $n_i = 0$  z rov. 34. Takový jedinec umožňuje algoritmu ohodnotit případ, kdy se zvažuje, že se do existující sítě nabíjecích stanic nevloží žádná nová stanice. Povolení této možnosti zabraňuje nucenému růstu sítě nabíjecích stanic při každé iteraci. Algoritmus není nucen vybrat nejméně 1 stanici, čímž by doporučoval, že minimálně 1 stanice musí být vždy postavena. Zejména v budoucnu, v pokročilejší fázi rozvoje nabíjecí infrastruktury bude vhodné, aby algoritmus měl možnost zastavit po nějakou dobu růst nových stanic. Zde podotkněme, že v takovém případě by byla dokonce užitečná schopnost algoritmu modifikovat již existující stanice včetně jejich kompletního odstranění.

Prázdný jedinec každopádně působí problémy při reprodukčním procesu. Jelikož sám neobsahuje žádnou genetickou informaci, v procesu křížení „ředí“ informaci ostatních. Tak dochází k úbytku genetické informace v populaci, což vede k nutnosti injektovat do populace informaci novou, čímž se konečně dostáváme k dlouze budovanému argumentu – totiž nutnosti vytvoření nového jedince pomocí funkce `getRandomGenotype()`. Tento požadavek způsobuje, že funkce `getRandomGenotype()` je navržena jako generátor

genotypu jedince, nikoliv celé populace, i když by se taková implementace mohla zdát správnější. Stručně řečeno: během reprodukčního procesu bývá někdy potřeba vytvořit nového samostatného jedince, na což je aktuální implementace vhodnější.

### 10.2.3 Reprodukční proces

Genetický reprodukční proces na populaci jedinců se tradičně skládá ze 3 samostatných fází. Jinak tomu nebude ani v případě CGA. Těmito fázemi se myslí operace selekce, křížení a mutace. V CGA přibude ještě čtvrtá fáze podmíněného obohacení populace, kdy na místo degenerovaných jedinců budou vygenerováni jedinci noví. Důvodem tohoto opatření se zabývá předchozí kapitola 10.2.2.

Celý reprodukční proces je implementován jako funkce

```
[offspring] = GAnormalReproduction(parents, popFval, genotypeParams)
```

pracující s genotypem celé jedné generace jedinců. Funkce je víceméně určená pouze k volání jednotlivých genetických operací. Jejím vstupem je jedna generace jedinců označená jako `parents`, jelikož z ní budou vybírání rodiče v operaci selekce. Druhým vstupem je `popFval`, tedy hodnota účelové funkce generace `parents`. Aby tuto hodnotu bylo možné získat, musela být generace `parents` již ohodnocena účelovou funkcí. Toho je dosaženo tak, že funkce `GAnormalReproduction()` se volá až od druhé generace. V první generaci solver pouze vygeneruje populaci pomocí `getRandomGenotype()`, nijak ji nekříží a rovnou ji ohodnotí účelovou funkcí. Tato populace pak v druhé iteraci figuruje jako rodičovská generace `parents`, na kterou již lze aplikovat reprodukční proces. Třetím vstupem je množina řídicích parametrů `genotypeParams` ve formátu  $\{maxNum, maxCon, maxQ\}$ . Výstupem funkce je následující generace potomků, kterou optimalizační solver následně ohodnotí z hlediska účelové funkce a předá ji v další iteraci funkci `GAnormalReproduction()` jakožto rodičovskou generaci.

První genetickou operací je selekce, jež je implementována funkcí

```
[selectedPairs, remainingIndividuals] = GAnormalSelection(parents, popFval)
```

Tato funkce vybírá dvojice jedinců z populace za účelem tvorby rodičovských párů pro operaci křížení. Vstupy funkce je generace rodičů `parents` a jejich individuální ohodnocení v proměnné `popFval`. Výstupy funkce jsou vybrané rodičovské páry `selectedPairs` a množina zbývajících jedinců `remainingIndividuals` z původní rodičovské populace, kteří se v této generaci neúčastní procesu křížení. Funkce pracuje s jedním řídicím parametrem specifickým pro proces selekce, totiž parametrem míry křížení `selRate`, který určuje, jaká část z celkového počtu rodičů bude vybrána za účelem následného křížení. Parametr `selRate` tedy nabývá hodnot z intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$  a je z něj odvozen skutečný počet vybraných dvojic `selNum` pomocí vztahu z rov. 35, kde `popSize` je celkový počet jedinců v populaci a `[ ], [ ]` jsou funkce horní, resp. dolní celá část čísla.

Díky této úpravě je `selNum` sudé číslo, což je přesně potřeba na vybrání rodičovských dvojic.

$$selNum = 2 \left\lfloor \frac{[selRate \cdot popSize]}{2} \right\rfloor \quad \text{Rov. 35}$$

$$|remainingIndividuals| = popSize - selNum \quad \text{Rov. 36}$$

Funkce funguje tak, že jedinci v populaci se nejprve seřadí podle hodnot svých účelových funkcí sestupně od nejlepší po nejhorší. Následně se vybere `selNum` nejlepších jedinců a ti se náhodně rozdělí do dvojic. Tento postup vybrání `selNum` nejlepších jedinců lze označit jako elitismus [82]. Není nezbytný a lze jej snadno utlumit až odstranit zvyšováním hodnoty parametru `selRate`. Stejný algoritmus tak může při správném nastavení tohoto parametru křížit většinu, popř. celou populaci, což už rozhodně za elitismus označit nelze.

Funkce tak vrací v parametru rodičovské páry `selectedPairs` připravené ke křížení a také vrací zbylé, nevybrané jedince `remainingIndividuals`, jejichž počet `|remainingIndividuals|` je dán rov. 36.

Druhou genetickou operací je křížení využívající vybrané rodičovské páry. Tato operace je implementována jako funkce

```
[children] = GAnormalCrossover(parents)
```

Z parametrů je zřejmé, že jejími vstupy jsou ony rodičovské páry, výstupy pak množina potomků. Připomeňme, že pokud rodič vstoupí do procesu křížení, tzn. pokud je vybrán v procesu selekce, pak umírá ve prospěch svých potomků, tedy nevstupuje do nové generace. To samozřejmě neplatí pro jedince z množiny `remainingIndividuals`, kteří nahrazení nejsou.

Navržená operace křížení funguje na principu výměny celých větví. Tento způsob byl vybrán po poměrně dlouhých úvahách o různých alternativních podobách křížení, přičemž se pochopitelně vycházelo ze standardního jedno- a vícebodového algoritmu křížení řetězců, resp. z aritmetického křížení reálných čísel např. pomocí průměru. Výsledkem těchto úvah bylo, že specifická podoba genotypu jedince sice omezuje možnosti křížení (nedají se křížit libovolná dvě čísla mezi sebou, jak tomu bývá u tradičního křížení řetězců, lze křížit jen odpovídající úrovně genotypu), ale na druhou stranu toto omezení zachovává konzistentnost genotypu, takže nevznikají patologičtí jedinci. V potaz proto byly vzaty následující možnosti křížení:

- 1) Výměna celých nabíjecích stanic.
- 2) Výměna jednotlivých konektorů na stanicích.
- 3) Výměna hodnot parametrů konektoru.

V procesu křížení by neměla vznikat nová genetická informace, které není obsažena v nějaké formě v rodičích. I při aritmetickém křížení dvou čísel od různých rodičů je

výsledný průměr sice nové číslo, které se ani v jednom z rodičů nevyskytuje, ale přesto jde pouze o elementární transformaci informace uložené v rodičích. Vnášení skutečně nové genetické informace do genotypu je doménou až operace mutace. Z toho plyne, že pokud se má proces křížení implementovat rigorózně, musí v našem případě jít o strukturální výměnu větví nebo listů stromu z obr. 45, odtud tři uvedené alternativy křížení. Podobný proces je ostatně běžný v genetickém programování [82]. Máme-li rozhodnout, která z uvedených alternativ výměny je nejvhodnější, pak porovnejme jednotlivé varianty. Ty jsou zřejmě seřazeny podle toho, jak velká část jedince je předmětem křížení. Stručně lze shrnout, že jedinci se skládají ze stanic, ty jsou složeny z jednotlivých konektorů a ty mají určité hodnoty parametrů. Nejbližší tradičním metodám křížení je varianta 3) výměna hodnot parametrů konektoru. Tímto opatřením se nemění struktura jedince, mění se pouze hodnoty na listech stromu. Problém je, že tímto způsobem lze z celkem 4 parametrů měnit bez omezení pouze parametry 2 (výkon a násobnost konektorů) a to z toho důvodu, že parametry zeměpisných souřadnic musí být pro všechny konektory v rámci jedné stanice stejné. Pokud bychom měli v úmyslu změnit souřadnice u jednoho konektoru, museli bychom změnit souřadnice u všech ostatních konektorů na téže stanici. To by ovšem znamenalo, že touto změnou přesouváme celou stanici na jiné místo. A protože hovoříme o křížení, tedy vzájemné výměně dvou množin těchto parametrů, pak to znamená, že tímto opatřením vyměňujeme pozice dvou nabíjecích stanic. A to není nic jiného, než navržené opatření ad 1).

Navržené opatření číslo 2) je sice zdánlivě jakýmsi mezistupněm mezi výměnou jednotlivých parametrů a celých stanic, ale při bližším pohledu zjistíme, že vazba na podmínku totožnosti parametrů zeměpisných souřadnic v rámci jedné stanice je zde naprosto stejně významná jako v předchozím případě. Pod myšlenkou výměny konektorů si lze intuitivně představit výměnu celých dvou různých větví vycházejících ze stanice. Z příkladu obr. 46 by jimi byly například prvky #1.1.1 nebo #1.1.2. Zároveň platí, že tyto konektory, jež jsou předmětem výměny, mohou být buď na téže stanici, nebo na dvou různých stanicích. Pokud jsou na téže stanici, pak mají totožné parametry zeměpisných souřadnic a liší se pouze svým hodnotami výkonu a násobnosti konektorů. To ale znamená, že jejich případné křížení se redukuje na proces výměny pouze 3. a 4. parametru. Toto je ovšem případ opatření ad 3) popsaného v předchozím odstavci. Pokud jsou naopak kříženy konektory na dvou různých stanicích, pak se budou lišit ve všech čtyřech parametrech. Zde však opět nastává problém s podmínkou totožnosti parametrů v rámci jedné stanice. Zaměníme-li konektory dvou různých stanic včetně jejich zeměpisných souřadnic, pak na obou stanicích budou konektory s různými zeměpisnými souřadnicemi, což porušuje stanovenou podmínku, a i intuitivně je takový stav zcela nesprávný. To znamená, že buď označíme opatření ad 2) za nepřijatelné, nebo jej redukuje pouze na výměnu 3. a 4. parametru. Tím však dostáváme opatření ad 3), z čehož plyne, že navržené opatření ad 2) je buď nepřijatelné, nebo neexistuje.

Nyní zbývá prozkoumat opatření ad 1), tedy výměnu celých stanic. Výměnu stanic lze chápat jako výměnu celých větví jedince označených na obr. 46 druhou úrovní číslování, tedy např. #1.1, či #5.2. Změna celých stanic uvnitř jedinců je vázána pouze podmínkou

jejich celkového počtu v rámci jedince, který je dán parametrem *maxNum*. Parametr říká, kolik maximálně stanic může jeden jedinec obsahovat. Výměnu dvou stanic uvnitř jednoho jedince netřeba uvažovat, jelikož na pozici stanice uvnitř jedince nezáleží. Jedince si lze představit spíše jako množinu stanic než jako jejich uspořádanou n-tici. Každopádně platí, že výměna dvou stanic v různých jedincích neovlivní velikosti těchto jedinců. Omezení dané parametrem *maxNum* lze proto v případě operace křížení zanedbat. Křížení celých stanic je ostatně i intuitivně poměrně přirozený proces. Každý jedinec představuje určitý soubor stanic, který je účelovou funkcí ohodnocován z hlediska své optimality. Stanice jsou v tomto souboru na sobě relativně nezávislé, jedna stanice může být objektivně lépe navržena než jiná (má lepší polohu a parametry). Taková stanice pak bude v jedinci působit jako faktor zlepšující jeho celkovou vhodnost z hlediska účelové funkce. Pokud dojde k výměně stanic, pak se tento zlepšující faktor přesune z jednoho jedince na druhého, čímž vzniká nová kombinace faktorů definující novou vhodnost jedince. Zde lze připustit námitku, že biologický genetický proces takto nefunguje, že křížení v něm je obecnější, není nutné křížit celé geny, dokonce mnohem častěji jsou kříženy nižší jednotky genetické informace. To je vskutku pravda, nicméně poznamenejme, že zde se pohybujeme v oboru umělé inteligence, kde zjednodušení je nezbytné, přičemž se běžně využívá křížení řetězců. Pokud považujeme našeho jedince za řetězec délky *maxNum*, pak navržená forma křížení odpovídá výměně prvků dvou rodičovských řetězců, což je nejběžnější forma křížení u běžných GA. Že prvek řetězce reprezentující genotyp jedince v našem případě není binární číslo, popř. znak ASCII tabulky, ale složitější podstruktura, je irelevantní. Dělitelnost tohoto prvku spíše rozšiřuje možnosti genetické reprodukce, ne naopak.

Z uvedeného srovnání plynou důvody výběru navrženého opatření ad 1) jakožto nejvhodnější varianty křížení. Toto nicméně platí s poznámkou, že samotná operace křížení nedokáže zabezpečit genetickou evoluci nižších úrovní genotypu, zejména samotných technických parametrů nabíjecích stanic, resp. jejich jednotlivých připojení.

Třetí operací v navrženém CGA je mutace listů stromu genotypu. Je implementována funkcí

```
[mutatedPop] = GAnormalMutation(population, maxCon)
```

kde vstup *population* je opět genotyp celé populace, v této fázi již po úspěšné operaci křížení, a vstup *maxCon* je řídicí parametr omezující počet různých připojení na jedné stanici. Výstup *mutatedPop* je potom zmutovaný genotyp populace. Funkce závisí na dvou vnitřních řídicích parametrech *mutStr* a *mutRate*. První z nich je parametr síly mutace, který udává, jaké procento z celkového počtu parametrů v listech stromu bude mutováno. Druhý udává, jaká je pravděpodobnost, že populace vůbec vstoupí do fáze mutace. Tradiční genetický algoritmus využívá operaci mutace poměrně zřídka, pravděpodobnost mutace jedince bývá řádově v jednotkách procent. Toto opatření je logické, neboť neustálá mutace populace vede k nestabilitě populace ve smyslu hodnoty účelové funkce. V navržené implementaci CGA je ovšem v populaci udržován aktuálně nejlepší jedinec, tudíž hodnota účelové funkce se nemění ani při neustálých mutacích. Její



hodnota se změní pouze tehdy, pokud se v populaci objeví jedinec s lepší hodnotou účelové funkce než má aktuálně nejlepší jedinec. Tento proces je konvergentní a čím více se nejlepší jedinec blíží globálnímu optimu, tím je nalezení lepšího jedince výpočetně náročnější. Tento proces se tak dá snadno ukončit vhodným kritériem zastavení, například počtem po sobě jdoucích iterací, ve kterých nedochází k nahrazení nejlepšího jedince.

Z těchto důvodů může parametr `mutRate` nabývat i vysokých hodnot, přičemž výsledkem je agresivnější mutace ústící v dynamičtější reprodukční proces. Výsledek mutace je současně omezen parametrem `mutStr`. Zatímco parametr `mutRate` udává pravděpodobnost, zda vůbec dojde k operaci mutace na dané generaci jedinců, parametr `mutStr` udává, kolik parametrů jedinců v populaci bude ovlivněno. Pochopitelně, i tímto parametrem lze ovlivňovat „agresivitu“ operace mutace a v implementaci je právě `mutStr` využit k adaptivnímu zvyšování agresivity mutace v případě, když populace stagnuje. To zajišťuje nižší výpočetní náročnost konvergence, i když patrně zvyšuje nestabilitu nalezeného výsledku.

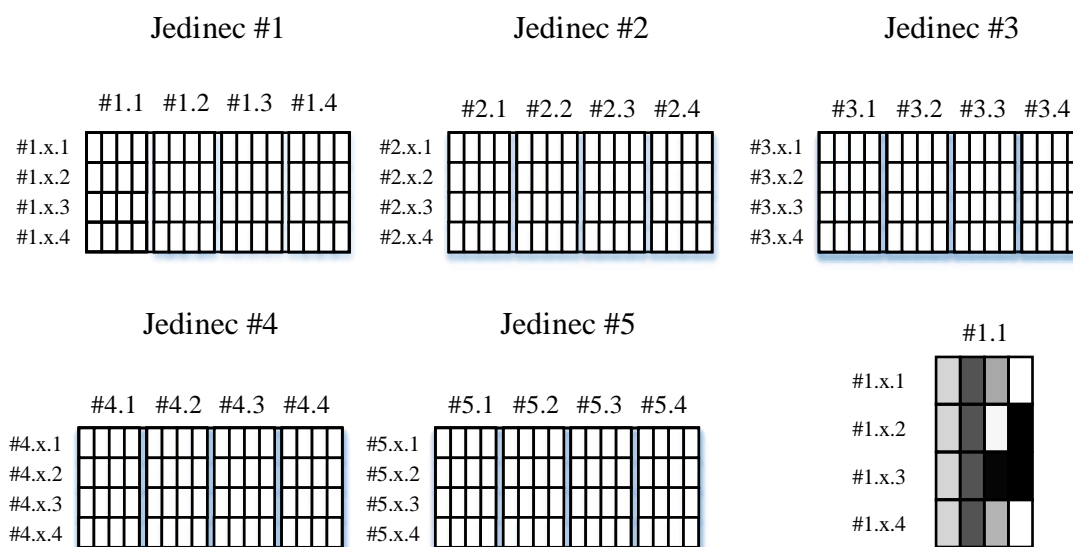
Mutovaným parametrem jedince se rozumí dále nedělitelný parametr nabíjecí stanice. To může být jediné číslo, v případě parametru výkon nebo násobnost připojení, v případě zeměpisné polohy připojení nebo stanice jde o několik čísel. Tímto se odkazujeme na výše představenou argumentaci ohledně operace křížení, kde byly vysvětleny požadavky na konzistentnost jedince z hlediska parametrů udávajících polohu jeho stanic. Výstupem funkce `GAnormalMutation` je potom celá nová populace, podobně jako u ostatních funkcí zajišťujících genetické transformace.

Selekce, křížení a mutace jsou standardní genetické operace. V implementaci CGA je ovšem přidána čtvrtá operace zabráňující populační degeneraci. Je implementována funkcí

```
[enrichedPop] = GAnormalEnrichPop(population, genotypeParams)
```

kde vstupy a výstupy jsou analogické jako pro ostatní genetické operace. Smyslem funkce je zajistit, aby v populaci nebylo příliš prázdných jedinců, tj. jedinců neobsahujících žádné nové stanice. Jak bylo řečeno výše, tyto jedinci jsou užiteční jakožto regulátory růstu počtu nabíjecích stanic. Jejich nevýhodou je ovšem to, že v operaci křížení nepřenáší do potomků žádnou novou genetickou informaci, pouze štěpí tu již existující. Operace mutace se navíc aktivně neúčastní, jelikož jedinec je prázdný, není v něm co alternovat, mutovat. Funkci `GAnormalEnrichPop()` si tak můžeme představit jako jakousi čtvrtou genetickou operaci, která zajišťuje vhodné zpracování prázdných jedinců. Funkce funguje velmi prostě. Pokud se v populaci vyskytuje více než povolený limit prázdných jedinců, defaultně se pracuje s hranicí více než jeden, pak je ponechán jen tento maximální přípustný počet prázdných jedinců a ostatní jsou nahrazeni nově vygenerovanými jedinci pomocí funkce `getRandomGenotype()`. Tím se do degenerující populace dostává nová genetická informace, se kterou mohou ostatní genetické operace standardně pracovat.

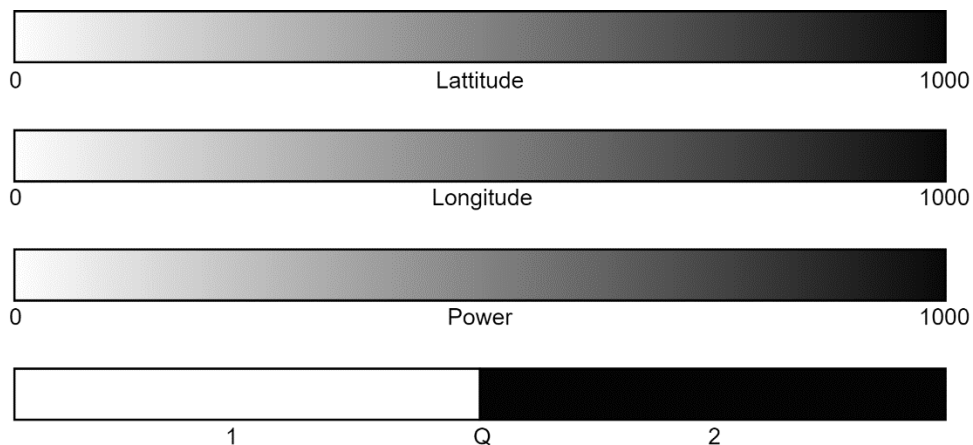
Závěrem této kapitoly je vhodné čtenáři přiblížit reprodukční proces jako celek pomocí grafické reprezentace proměny populace během jednotlivých generací. Pro tento účel vycházejme ze stromové struktury genotypu uvedeného na obr. 45, pouze tuto strukturu pro přehlednost zjednodušíme. Nejprve vytvoříme kompresi celé stromové struktury do pole, jehož kostra uvedená na obr. 47 reprezentuje původní strom. Toto pole současně definuje povolený rozsah jedinců a jejich parametrů, jež se v našem příkladu budou vyskytovat. Maximální počet jedinců je 5, každý jedinec může obsahovat maximálně 4 nabíjecí stanice a každá stanice může obsahovat maximálně 4 samostatná nabíjecí připojení. Není nutné, aby počet, jedinců a připojení a jejich jednotlivých parametrů byl totožný, v použitém příkladu jde čistě o náhodu.



Obr. 47: Základní kostra pole vzniklé transformací stromové struktury populace  
(Zdroj: vlastní zpracování)

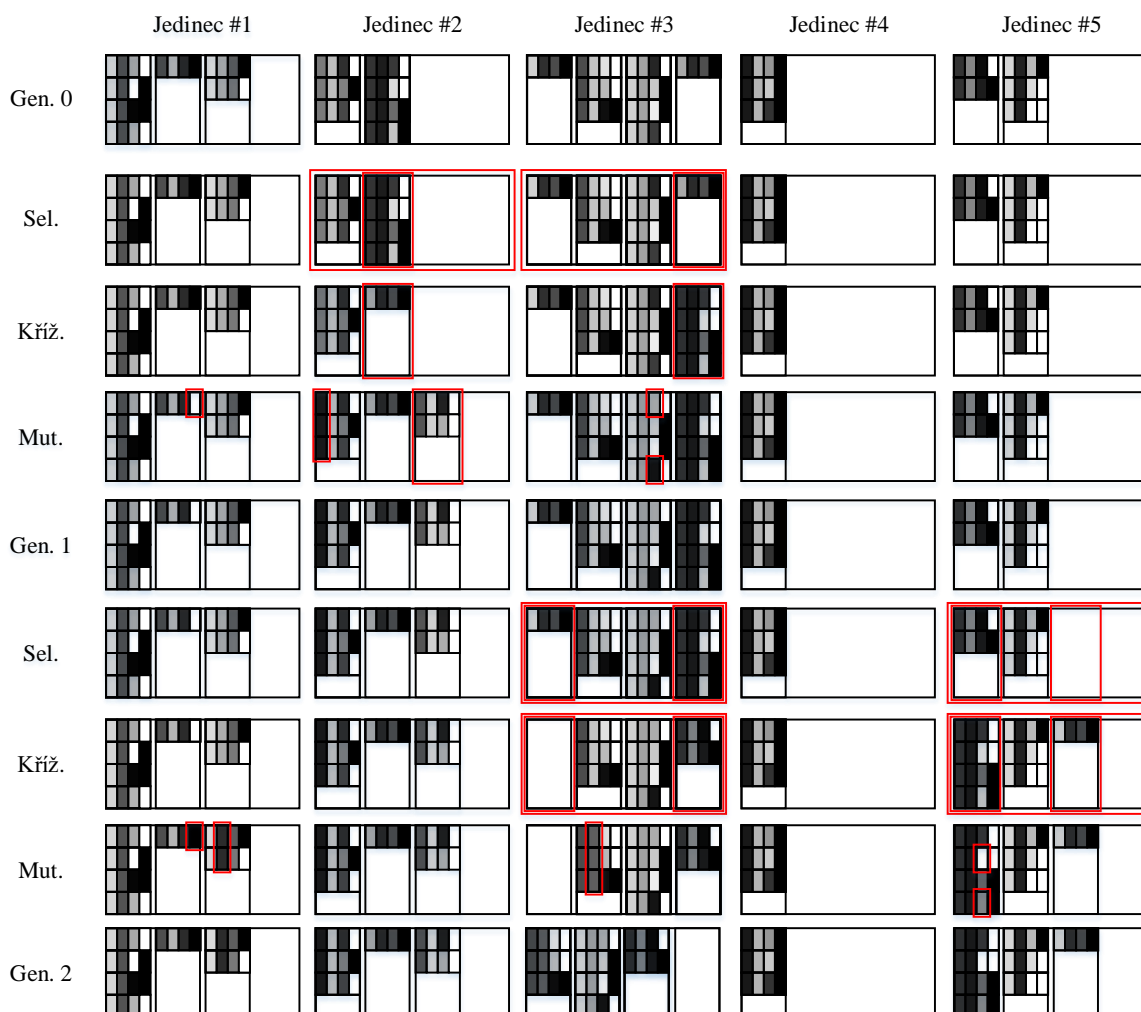
Každá buňka může reprezentovat určitou hodnotu pomocí černobílé barevné škály, nebo reprezentovat absenci určité části jedince svou nepřítomností. Posledně řečené znamená, že jedinec nemusí být zobrazen jako plná mřížka o 64 polích, ale částečně bude prázdný, což jednoduše znamená, že neobsahuje maximální množství stanic nebo připojení.

Černobílá barevná škála je demonstrována na obr. 47 na případě jedince #1 a jeho první stanice #1.1. Hodnoty vycházejí z příkladu na obr. 45. Barva reprezentuje hodnotu parametru spadající do určitého intervalu, který může být spojitý nebo diskrétní. Čím nižší hodnota, tím světlejší barva. Dolní okraj intervalu je černý, horní okraj je bílý. V případě prvních tří parametrů z intervalu  $\langle 0; 1000 \rangle$  je hodnota 0 reprezentována černou barvou, hodnota 1000 bílou, a ostatní hodnoty odpovídajícími stupni šedi. V případě čtvrtého parametru, který může nabývat hodnoty z množiny  $\{1,2\}$ , je hodnota 1 reprezentována černou a hodnota 2 bílou barvou. Barevné kódování genotypu zachycuje obr. 48.



Obr. 48: Škála barevného kódování genotypu jedince  
(Zdroj: vlastní zpracování)

Do základní struktury z obr. 47 je zanesena genetická informace výchozí populace a pomocí navrženého procesu genetické transformace (CGA algoritmu) jsou z ní vytvářeny nové generace jedinců. Tento proces demonstruje obr. 49, kde je možné vidět přeměnu populace z původní generace 0 na novou generaci 2.



Obr. 49: Grafická demonstrace algoritmu CGA  
(Zdroj: vlastní zpracování)

Na obr. 49 začíná proces reprodukce náhodně vygenerovanou počáteční generací pěti jedinců označenou jako Gen. 0. Algoritmus by tuto počáteční populaci vytvořil pomocí funkce `getRandomGenotype()` generující náhodný genotyp jednoho jedince v rozsahu zadaných řídicích parametrů. Hodnoty v populaci jsou kódovány podle výše zmíněných barevných a strukturálních pravidel, přičemž jak vidíme, ne všichni jedinci jsou stejně velcí ve smyslu jejich obsahu.

Počáteční populace je na obrázku následně podrobena první iteraci genetických transformací sestávající z trojice selekce, křížení a mutace. V procesu selekce jsou náhodně vybrány dvojice jedinců, přičemž počet dvojic je dán parametrem `selRate`. Výchozí hodnota tohoto parametru je 0,5, což znamená, že vybraný počet jedinců je nejvýše 50 % všech jedinců v populaci. Vybírány jsou páry, takže zároveň musí platit, že vybraný počet jedinců je sudé číslo. V našem případě 5 jedinců v populaci jsou proto vybráni právě 2 jedinci jakožto jediný rodičovský pár. Více párů by při stejné hodnotě parametru `selRate` mohlo být vybráno až při 8 a více jedincích v populaci.

Na obrázku je v řádku selekce znázorněn ještě výběr konkrétních částí rodičovských jedinců pro potřeby křížení. Zvolení počtu těchto částí (nabíjecích stanic) i jejich samotný výběr však spadá až do procesu křížení. Na obrázku jsou však pro názornost vybrány tyto části již na řádku selekce a na následujícím řádku křížení jsou tyto části prohozeny – kříženy.

Poslední operací mutace se do populace dostává nová genetické informace. Ta je nezbytná proto, že prostým křížením (tak, jak je aktuálně navrženo) nelze vytvářet nové neexistující stanice ve smyslu modifikace parametrů stanic původních. Obrázek znázorňuje, v čem mutace spočívá. Jde o náhodnou modifikaci libovolného jedince, přičemž parametry jeho stanic jsou změněny tak, aby odpovídaly požadovaným strukturálním pravidlům. Zejména jde o pravidlo konzistence zeměpisných souřadnic v rámci jedince, tzn. jestliže je v procesu mutace vybrán parametr zeměpisné souřadnice stanice, pak tento parametr musí být změněn na všech jejích připojeních. To v zásadě znamená, že se celá stanice posouvá v určitém směru podél zeměpisné délky nebo zeměpisné šířky, podle vybraného typu parametru.

Po těchto třech transformacích získáváme novou generaci jedinců, v obrázku označenou jako Gen. 1, která figuruje jako generace výchozí v následující iteraci CGA. Průběh této následující iterace je obdobný. Znovu sestává ze tří základních transformačních fází, nicméně příklad na obrázku demonstruje situaci výběru prázdného jedince. CGA umožňuje výběr prázdného jedince pro zvýšení realističnosti. Zdůvodnění tohoto opatření je k dispozici výše v této kapitole u popisu funkce `GANormalEnrichPop()`. V ilustrativním příkladu obrázku vidíme jeden z důsledků takového opatření. Transformaci křížení je dána možnost jednostranně přesunout určitou stanici mezi jedinci populace, aniž by došlo k faktické náhradě této stanice v původním jedinci. Nejedná se tedy o klasický příklad křížení, kdy se dvě části dvou různých jedinců prohodí. Zde první

jedinec ztrácí bez náhrady určitou svou část a druhý jedinec tuto část získává bez nutnosti recipročně něco vracet. V jistém smyslu jde o zobecnění principu křížení. Na operaci křížení je pak navíc vidět možnost vybrání více než jedné části rodičů, což by ve standardní terminologii připomínalo vícebodové křížení.

Operace mutace v druhé iteraci je na obrázku analogická jako v iteraci předchozí. Zde však ještě uveďme, že i když to obrázek záměrně neobsahuje, má CGA ještě k dispozici možnost mutovat prázdnou stanici na plnou a naopak. To je provedeno za pomoci funkce `GANormalEnrichPop()` a k takovému opatření se přistupuje v případě, že se populace vyvíjí nežádoucím směrem. Detaily jsou popsány opět výše, u představení funkce `GANormalEnrichPop()`. Po druhé iteraci transformací získáváme novou generaci Gen. 2, kde pouze vizuálně upravujeme jedince 3, tj. „zarovnáme“ stanice vlevo. Na pořadí stanic v jedinci nezáleží, stejně jako nezáleží na pořadí jednotlivých připojení v rámci stanice. To vychází z původní stromové struktury genotypu, s nímž pracuje algoritmus CGA. Na pořadí 4 parametrů každého připojení však záleží. To znamená, že čtveřici buněk na třetí úrovni stromu (např. 1.1.1) považujeme dále za strukturálně nedělitelnou jednotku. tj. list stromu.

#### 10.2.4 Překlad genotypu na fenotyp

Výstupem předchozí kapitoly je nová, geneticky transformovaná generace jedinců vyjádřená svým genotypem. Jedinci ovšem slouží k tomu, aby byli ohodnoceni účelovou funkcí. V této chvíli však zatím nemáme jedince jako takové, máme pouze jejich genotypy. Je proto potřeba přeložit genotyp na fenotyp pomocí funkce

```
[stations] = genotype2phenotype(existingStations, genotype)
```

Vstupem funkce je samozřejmě překládaný genotyp jedince `genotype`, ale funkce požaduje i množinu existujících stanic `existingStations`. Její význam bude podrobně vysvětlen v kapitole 10.2.5, zde pouze konstatujme, že se jedná o množinu stanic vycházející z databáze nabíjecích příležitostí na území ČR, která se rozebírá v kapitole 7.2. Translační funkce `genotype2phenotype()` potřebuje tuto množinu k určení definičního oboru jednoho z parametrů stanice, konkrétně výkonu. Parametr výkonu stanice nabývá v genotypu spojitého intervalu  $\langle 0; 1000 \rangle$  a musí být přeložen do skutečné hodnoty výkonu reálné nabíjecí stanice. Výkon stanice lze sice považovat za spojitou veličinu, faktem ovšem je, že reálné nabíjecí stanice se produkují pouze v určitých výkonostních hladinách. A právě tyto různé hodnoty, kterých může výkon stanice nabývat, jsou získány z již existujících exemplářů stanic z proměnné `existingStations`. Každá unikátní hodnota výkonu obsažená v `existingStations` potom vytyčuje prostor, ve kterém se pohybují přípustné hodnoty výkonu stanice. Spojitá veličina v genotypu je takto přeložena do diskrétní veličiny ve fenotypu. Analogicky je tento překlad proveden i pro ostatní parametry. Výsledné hodnoty, kterých mohou jednotlivé parametry nabývat lze ilustrativně nalézt v tab. 13.

Funkce `genotype2phenotype()` očekává na vstupu postupně každého jedince populace zvlášť, takže i její výstup musí odpovídat fenotypu samostatného jedince. Každý jedinec

je považován za samostatnou množinu tzv. kandidátních stanic, tedy různých souborů stanic, které odpovídají možnému optimálnímu řešení účelové funkce. Kandidátní stanice ovšem nemohou být účelovou funkcí ohodnoceny samostatně, musí být obohaceny o množinu existujících stanic.

### 10.2.5 Obohacení o množinu existujících stanic

Nyní se dostáváme k jednomu z klíčových bodů celého optimalizačního modelu. Řeč je o povaze skutečného vstupu účelové funkce. V kapitole 9.4 zabývající se účelovou funkcí je zmínka o tom, že vstupem účelové funkce musí být množina všech stanic existujících v daném časovém okamžiku na území ČR. Tato množina musí obsahovat jak stanice již postavené, existující, tak stanice, které se postavit chystají. Ve světle optimalizačního algoritmu jde o stanice navrhované, kandidátní. To znamená, že každý jedinec populace reprezentující určitou množinu kandidátních stanic generuje unikátní vstup účelové funkce. Tento unikátní vstup je sestaven pomocí funkce

```
completeStationSet = addNewStations(newStations, existingStations)
```

kde vstupem je množina kandidátních stanic `newStations`, množina existujících stanic `existingStations` a výstupem je jejich spojení `completeStationSet`. Funkce samotná je zcela triviální, pouze sestaví ze dvou množin vstupů jedinou proměnnou, přičemž testuje, zda množina nových stanic není prázdná. To by nastalo, jestliže nové stanice by byly reprezentovány již několikrát diskutovaným prázdným jedincem. Konečná proměnná `completeStationSet` je poté ohodnocena účelovou funkcí.

### 10.2.6 Kritéria zastavení

CGA optimalizační solver ohodnocuje cyklicky každého jedince populace zvlášť, dokud nejsou získány hodnoty účelové funkce pro celou populaci. Poté je třeba tyto nově získané kvalitativní charakteristiky populace ohodnotit ve světle ostatních generací, tj. zjistit, zda nová generace obsahuje jedince s lepší hodnotou účelové funkce. Pokud obsahuje, pak je nutné tohoto jedince uložit do separátní proměnné jakožto nové nejlepší řešení účelové funkce. Pokud v nové generaci takový jedinec není, pak je aktivován čítač po sobě jdoucích generací, které nevykázaly zlepšení hodnoty účelové funkce (consecutive stall generation counter). Tento čítač, nazvěme jej čítačem impotentních generací, je resetován, jestliže se v generaci objeví jedinec zlepšující hodnotu účelové funkce.

Optimalizační solver iterativně provádí celý blok operací popsaných v kapitolách 10.2.2 až 10.2.5, dokud čítač impotentních generací nedosáhne hranice nastavené v úvodu solveru. Tento čítač spolu s kritériem jeho maximální přípustné hodnoty lze označit jako kritérium zastavení algoritmu CGA. Jakmile je aktivováno kritérium zastavení, solver zastaví iterativní proces reprodukce a ohodnocování populace a vrátí aktuálně nejlepšího jedince jakožto optimální řešení účelové funkce. Označení optimální je zde pochopitelně chápáno jako heuristicky nalezené, tudíž „nejlepší z dostupných“.

### 10.2.7 CGA pro více období

Základní verze CGA ve formě `GAnormalSolver()` uvažuje jediné období, během kterého jsou nabíjecí stanice rozmisťovány. Celý optimalizační model je však koncipován tak, že počítá s iterativním rozšiřováním sítě nabíjecích stanic, tedy s jejich postupným umisťováním na vhodná místa. Aby bylo možné plně demonstrovat schopnosti optimalizačního modelu, musí být CGA solver uzpůsoben pro variantu pracující s více po sobě jdoucími obdobími. Za tím účelem byl původní solver modifikován do funkce

```
[bestFvalMP, bestFvalHistoryMP, bestStationsMP, fullPopFvalMP] =  
GAnormalSolverMultiplePeriods(objFcn, optOptions)
```

Jeho vstupy a výstupy jsou totožné jako v případě `GAnormalSolver()`, pouze obsahují výsledky optimalizace pro všechna sledovaná období. Solver `GAnormalSolverMultiplePeriods()` funguje tak, že nejlepší jedinec nalezen v  $i$ -tém období je zařazen do množiny existujících stanic v období následujícím. Každé období kromě prvního tedy pracuje s aktuální sítí stanic, včetně potenciálně nově postavených. Rozmístění stanic v jednotlivých obdobích nejsou optimalizačně provázána, tzn. Algoritmus optimalizuje každé období zvlášť, nezávisle na ostatních. Výsledná sekvence rozmisťování stanic se proto může stát v některých případech mírně podivnou, může docházet i ke zhoršování funkční hodnoty mezi obdobími. To však není chyba, jde o zdokumentovanou vlastnost.

Rozšíření funkcionality tak, aby byla optimalizována celá sekvence rozmístění stanic přes všechna období, by si žádala nejen úpravu optimalizačního algoritmu, ale rovněž určité změny v účelové funkci. Ta by musela být upravena do tvaru, kdy jednotlivá období tvoří její dílčí hodnoty. Období by byla časově diskontována a finální hodnota účelové funkce by pak byla součtem těchto časově diskontovaných dílčích účelových funkcí za příslušná období. Taková úprava modelu by mohla být náplní budoucího výzkumu.

## 10.3 Možné rozšíření optimalizačního modelu

Pojednejme nyní stručně o možnostech rozšíření navrženého optimalizačního modelu a metody jeho řešení. V zásadě budeme uvažovat dvě možné varianty rozšíření, které se ovšem vzájemně nevylučují. Rigorózní analýza a implementace obou by však vyžadovala podrobnější a delší výzkum ústící potenciálně v sérii odborných článků. Z toho důvodu předkládaná práce tato témata nepokrývá, pouze poskytuje náznak směru, jakým by se mohl ubírat budoucí výzkum.

### 10.3.1 Optimalizace rozmisťovací sekvence

První z možných rozšíření se vztahuje k takové modifikaci účelové funkce, aby se neoptimalizovalo rozmístění pouze v následujícím období (kvartále), ale aby se hledala celá optimální sekvence postupného rozmisťování stanic v čase. Obecně totiž nemusí platit, že soubor stanic, které byly optimálně rozmístěny z hlediska pouze jednoho následujícího období, je optimální také tehdy, pokud jej uvažujeme z hlediska více než jednoho časového období. Jinak řečeno, pokud se zeptáme původního CGA algoritmu:

„jaké je optimální rozmístění stanic zvlášť v období  $O_1$  a období  $O_2$ “, pak jeho souhrnná odpověď nemusí být stejná jako pokud se zeptáme modifikovaného sekvenčního  $CGA_m$ : „jaká je optimální sekvence rozmístění stanic v období  $O_1$  až  $O_2$ “. Může totiž nastat situace, kdy normální CGA v prvním případě vrátí odpověď „v  $O_1$  postav množinu stanic  $A$ , v  $O_2$  množinu stanice  $B$ . V případě sekvenčního rozmístování nám pak modifikovaný algoritmus  $CGA_m$  může dát odpověď „v  $O_1$  postav množinu stanic  $C$  a v  $O_2$  množinu stanice  $D$ “, přičemž hodnota modifikované sekvenční účelové funkce v algoritmu  $CGA_m$  bude  $F_m(C, D)$ . Pokud ovšem dosadíme  $F_m(A, B)$ , tedy množiny stanic zjištěné algoritmem CGA, pak nemusí nutně platit, že  $F_m(A, B) = F_m(C, D)$ . Obecná neplatnost tohoto vztahu demonstruje onen problém. Vztah mezi algoritmy CGA a  $CGA_m$ , který pak demonstruje celou situaci výstižněji, pak zřejmě bude vztahem z rov. 37. Tam je  $F_m()$  modifikovaná účelová funkce vztahující se k algoritmu  $CGA_m$ , kterou minimalizujeme,  $X_1$  až  $X_{O_{max}}$  jsou stanice optimálně rozmístěné algoritmem CGA,  $Y_1$  až  $Y_{O_{max}}$  jsou stanice rozmístěné algoritmem  $CGA_m$  a  $O_{max}$  je počet uvažovaných rozmístovacích období. Ze vztahu vyplývá, že časově lokálně optimální rozmístění  $X$  budou pravděpodobně z pohledu funkce  $F_m()$  horší nebo nanejvýš stejná než časově globálně optimální rozmístění  $Y$ .

$$F_m(X_1, X_2, \dots, X_{O_{max}}) \geq F_m(Y_1, Y_2, \dots, Y_{O_{max}}) \quad \text{Rov. 37}$$

Návrh důmyslné účelové funkce a optimalizačního algoritmu  $CGA_m$  by pak mohl být předmětem dalšího výzkumu, stejně jako důkaz rov. 37, jelikož ta je na tomto místě pouze racionálním předpokladem.

### 10.3.2 Optimalizace optimalizační metody

Druhým z možných rozšíření se vztahuje k optimalizační metodě. Současný CGA algoritmus je navrženou heuristikou, která má schopnost účelovou funkci minimalizovat, nicméně předkládaná práce neobsahuje důkaz toho, že jde o algoritmus k tomuto účelu nejvhodnější. Charakteristická vlastnost účelové funkce z hlediska optimalizace je její velká výpočetní složitost. Tu se podařilo snížit aplikací paralelizace na GPU, nicméně optimalizačnímu algoritmu CGA trvá řádově několik hodin, než stabilně zkonverguje k optimálnímu řešení. Navíc povolený čas konvergence je poměrně krátký, což znamená, že algoritmus může snadno uváznout v lokálním extrému.

Cílem budoucího výzkumu by tedy mohlo být nejen zrychlení současného CGA, ale i jeho případné přepracování nebo nahrazení jiným optimalizačním algoritmem, který vůbec nemusí být založen na genetických algoritmech. Optimalizační metoda totiž může modifikovat populaci jedinců jakýmkoliv způsobem, který zaručí, že řešení bude nalezeno co nejrychleji a nejpřesněji, a současně nebude tento proces trpět stagnací populace kolem lokálních extrémů, případně velkou rozkolísaností nalezených řešení.

Níže uveďme některá konkrétní opatření, která by mohla mít pozitivní vliv na schopnosti algoritmu efektivně rozmísťovat stanice. Lze například oddělit evoluci struktury genotypu od evoluce datového obsahu genotypu, tzn. lze samostatně modifikovat počet



stanic a konektorů a samostatně modifikovat hodnoty jako souřadnice polohy nebo výkon a násobnost daného připojení. Každé z těchto dvou věcí má totiž rozdílný efekt. Zatímco modifikace struktury genotypu v zásadě rozšiřuje kvantitativně schopnosti daného jedince (množiny rozmíst'ovaných stanic), umožňuje mu měnit svou plasticitu, modifikace hodnot genotypu je kvalitativním posunem jedince již jednou dané velikosti směrem k optimu. Jde o tvrzení poněkud abstraktní, ale představme si to analogicky na regresním modelu. V případě regrese můžeme uvažovat změnu struktury modelu, nebo změnu hodnot parametrů modelu. Struktura modelu definuje, zda použijeme polynomiální, exponenciální, nebo třeba logistický model, zda to bude polynomiální model prvního, druhého nebo vyššího stupně apod. Hodnoty parametrů pak definují na již pevně dané struktuře to, kde se například polynom prvního stupně (regresní přímka) bude v prohledávaném prostoru nacházet, a jak dobře či špatně bude aproximovat data, tedy jak blízko bude ke své optimální poloze.

V případě CGA je struktura genotypu modifikovatelná podobně jako bychom se v případě regresního modelu rozhodovali mezi typem regresního modelu. Vedle struktury jsou však modifikovatelné i hodnoty k této struktuře se vztahující. Problém je, že když navržený optimalizační algoritmus modifikuje oba typy těchto volných parametrů současně, pak dělá pokaždé trochu něco jiného. Jestliže modifikuje parametry určité stanice uvnitř nějakého jedince, pak vlastně říká, kde má tato stanice stát a jaký má být její výkon. Pokud však modifikuje celou strukturu jedince, pak říká, kolik stanic se má postavit. Lze tedy uvažovat, že v rámci pokročilejšího algoritmu by měly být tyto fáze striktněji odděleny než doposud a algoritmus by k nim přistupoval odděleně.

S tím souvisí hned další možnost rozšíření modelu, a to zejména jeho rychlejší konvergence ke globálnímu optimu a rychlejší zastavení. Například by se dala použít kombinace pomalejšího heuristického prohledávání prostoru s rychlejším lokálním prohledáváním deterministickým algoritmem (například gradient descent). Zároveň z hlediska fungování účelové funkce by bylo možné podrobněji rozebrat průběh nejnáročnějšího výpočtu meshe a například nepočítat plné mesh matice obsahující 3,75 milionu hodnot. Bylo by možné počítat pouze submatice relevantní k lokalitě dané stanice a ostatní hodnoty zanedbat, jelikož je aktuální iterace algoritmu stejně nevyužívá. Tím by se urychlil výpočetní čas, což by snížilo nároky kladené na optimalizační algoritmus. Určité pokusy s konstrukcí a polohováním submatic byly provedeny a výsledky vypadaly slibně. Problematika se však ukázala příliš komplikovanou na její přímé zahrnutí do práce. Její řešení by totiž vyžadovalo rozsáhlý komparativní výzkum vlivu použití submatic na přínosy GPU paralelizace, a tedy velikost výsledného efektu opatření na výpočetní náročnost účelové funkce. Mohlo by se totiž stát, že aktuálně aplikovaný pozitivní efekt z paralelizace na GPU by se snížil natolik, že by pozitivní efekt z použití výpočtu submatic tento pokles výkonu nevykompenzoval. Z toho důvodu bylo téma raději ponecháno pro budoucí výzkum.

## 11 Výsledky

Kapitola prezentující výsledky optimalizace na konkrétních datech.

### 11.1 CGA Jedno období

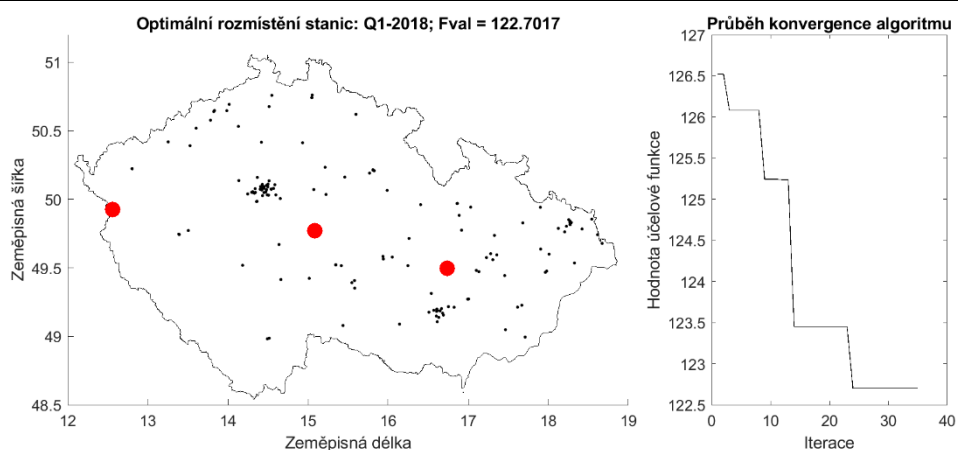
Optimalizační algoritmus simulující 1 období představený v kapitole 10.2 je aplikován na příkladu dat aktuálních pro začátek roku 2017. Vychází se z databáze existujících nabíjecích stanic tvořící nabídku nabíjecí služby ke konci roku 2016, přičemž model poptávky simuluje hodnotu poptávky po nabíjení v prvním kvartále roku 2017.

Řídící parametry optimalizačního algoritmu CGA jsou:

```
popSize = 5  
maxNum = 3  
maxCon = 4  
maxQ = 2  
maxStallGen = 10
```

Z nastavení plyne, že maximálně mohou být umístěny 3 stanice.

Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Výkon individuálních připojení v kW	Počet konektorů
49,7684850266216	15,0866133788399	51200	1
		20160	1
		2944	2
		40960	2
49,4952277443510	16,7401908872887	8000	2
		5888	1
49,9241356769361	12,5593181126970	3072	2
		3200	2
		3200	1
		3072	2



Obr. 50: Výsledek optimalizace metodou CGA pro jedno období  
(Zdroj: vlastní zpracování)

Z obr. 50 je patrné vybrané umístění nabíjecích stanic. Každá červená tečka značí jednu stanicí, přičemž každá má unikátní sadu parametrů. Zajímavější situace vznikne, jestliže použijeme pokročilejší variantu algoritmu CGA schopnou optimalizovat více po sobě jdoucích obdobích.

## 11.2 CGA více období

Druhá verze algoritmu CGA pracuje s optimalizačním modelem, který rozmisťuje stanice po několik po sobě jdoucích obdobích. Následující obrázky této kapitoly demonstrují výsledky.

Nejprve je prozkoumána rychlejší varianta s menší populací jedinců. Řídící parametry této varianty optimalizace jsou:

```
popSize = 5
maxNum = 3
maxCon = 4
maxQ = 2
maxStallGen = 10
quarNum = 4
```

Výsledky jsou zobrazeny postupně na obr. 51 až obr. 54 spolu s grafem konvergence hodnoty účelové funkce postupně pro jednotlivé po sobě jdoucí kvartály od Q1/2018 do Q4/2018.

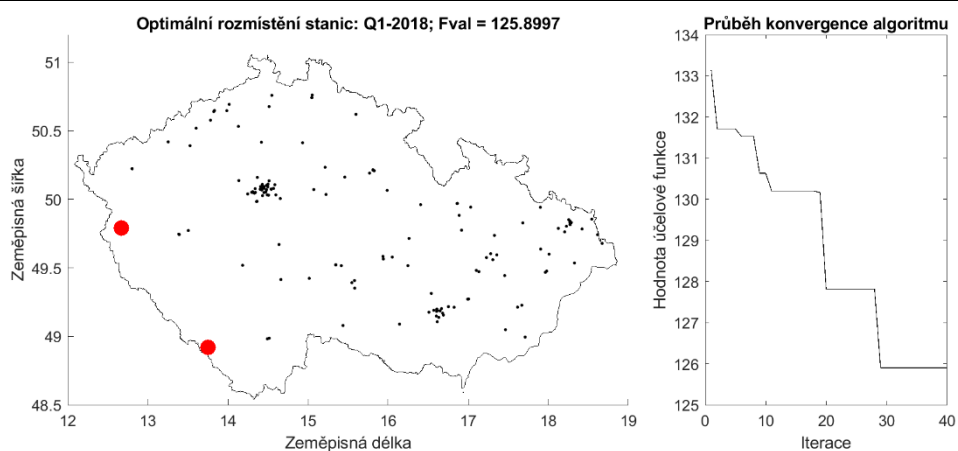
Obrázky znázorňují postupné přidávání stanic do existující sítě. Algoritmus ovšem nemá vlastnost synchronizace mezi jednotlivými kvartály. To znamená, že v každém období se snaží vložit stanice s nejlepšími technickými parametry a umístěním z hlediska pouze daného období, přičemž pochopitelně bere v úvahu dříve umístěné stanice. Na obrázcích jsou nově přidané stanice znázorněny červenou tečkou, původní stanice jsou zobrazeny jako malé drobné černé tečky. Stanice, které byly algoritmem kumulativně přidány v předchozích iteracích, jsou zobrazeny jako velké černé tečky.

V rámci jednoho obrázku algoritmus vždy konverguje, resp. nenastává případ, kdy by nejlepší nalezené hodnoty účelové funkce rostly. Mezi obrázky, tj. mezi jednotlivými kvartály, ovšem růst účelové funkce může nastat. To po tom znamená, že z pohledu celého období nemusí optimální hodnota účelové funkce monotónně klesat. Toto není chyba, jde o logický důsledek návrhu účelové funkce. Toto si pravděpodobně zaslouží alespoň stručné objasnění.

Standardní optimalizační algoritmy pracují tak, že v jednotlivých iteracích je průběh hodnoty optimalizované veličiny monotónní, tzn. při minimalizačních úlohách nerostoucí. V navrženém optimalizačním modelu bylo od počátku počítáno s tím, že účelová funkce je v čase proměnlivá. Pokud nejsou do sítě přidávány nové stanice, její hodnota nejčastěji poroste tak, jak poroste poptávka po nabíjecí službě. Zde je třeba počítat s jednou výjimkou tehdy, pokud poptávka poroste na takových místech, kde jsou postaveny naddimenzované nabíjecí stanice. Takové stanice jsou totiž nevyužité, ovlivňují účelovou funkci negativně. Při růstu poptávky pouze na těchto stanicích tedy

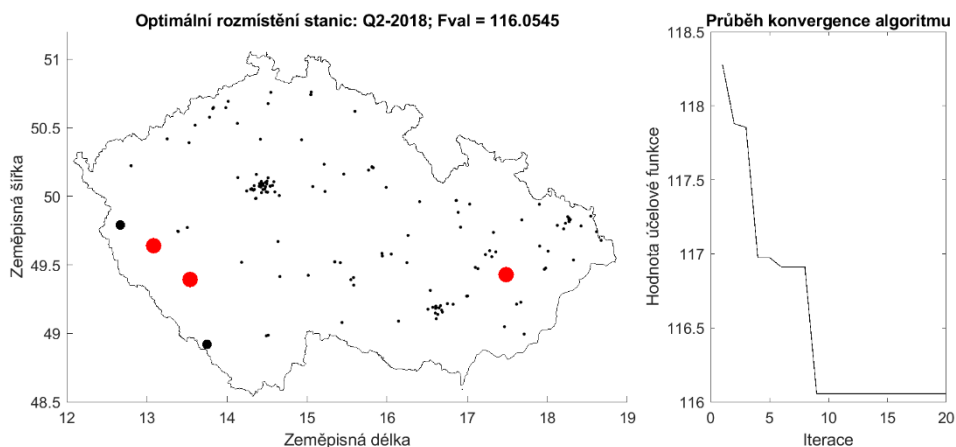
dojde k lepšímu vyřízení stanice, což způsobí samovolné zlepšení hodnoty (pokles) účelové funkce, i když žádné stanice nebudou přidány. Většinou ovšem bude účelová funkce v čase růst z důvodu růstu vytiženosti stanic (za předpokladu rostoucí poptávky a konstantního počtu stanic). Může tedy nastat situace, že poptávka mezi kvartály vzroste natolik, že nově přidávané stanice nebudou schopny kompenzovat její růst a výsledná hodnota účelové funkce v daném kvartále bude vyšší než výsledná hodnota účelové funkce v kvartále předchozím.

Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Výkon individuálních přípojení v kW	Počet konektorů
48,9183488247804	13,7491892696566	160000	1
		48000	2
		20160	2
49,7921633240404	12,6670125106705	23552	1



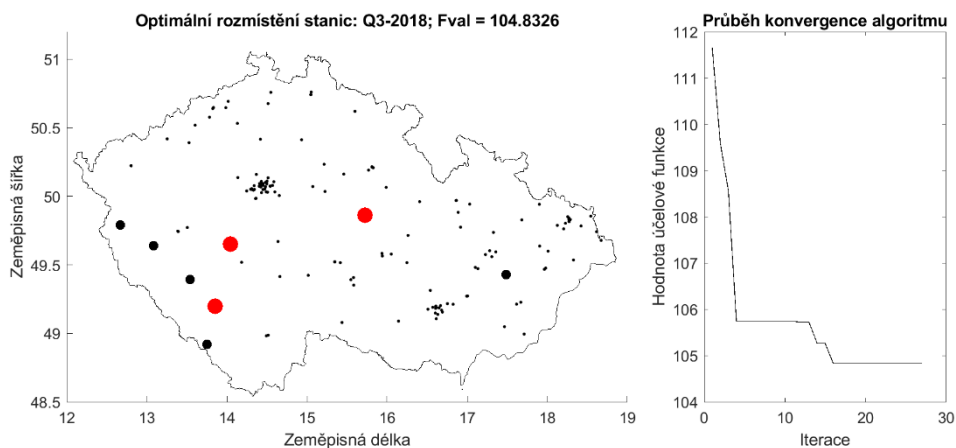
Obr. 51: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období, výsledek pro Q1/2018 (Zdroj: vlastní zpracování)

Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Výkon individuálních připojení v kW	Počet konektorů
49,3912824299456	13,5376348529965	23552	2
49,4288109633658	17,4896331766478	14720	1
		41600	1
49,6410843158782	13,0830286972059	2944	2
		920	1
		160000	2
		6400	1



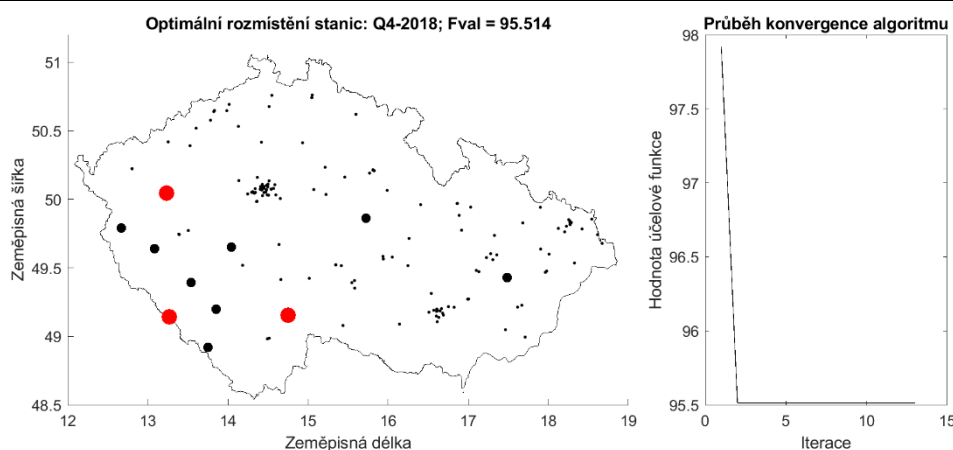
Obr. 52: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období, výsledek pro Q2/2018 (Zdroj: vlastní zpracování)

Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Výkon individuálních připojení v kW	Počet konektorů
49,8637185963676	15,7265241938120	5120	2
49,6526584602379	14,0408213443956	17664	2
		8320	1
		20480	2
		2560	2
49,1988197105387	13,8546442930705	3072	2
		11776	1
		30720	2
		3072	2



Obr. 53: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období, výsledek pro Q3/2018 (Zdroj: vlastní zpracování)

Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Výkon individuálních přípojení v kW	Počet konektorů
50,0451125220851	13,2360423107612	30720	2
		3200	1
		5120	1
49,1419798086127	13,2653241864853	200000	2
		2560	2
		3072	2
49,1558494780668	14,7515500838234	40960	2



Obr. 54: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období, výsledek pro Q4/2018  
(Zdroj: vlastní zpracování)

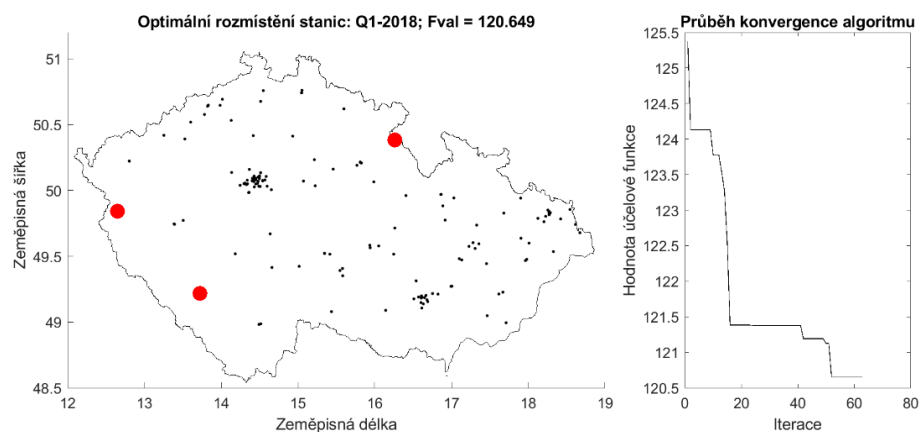
V rámci tvorby optimalizačního algoritmu bylo testováno jeho chování při různých parametrech. To vyžadovalo opakované pouštění buď části, nebo celého běhu algoritmu, aby byl autor schopen algoritmus odladit a odstranit všechny chyby technického a logického rázu. Nejvíce času zabralo odstranění chyb v meziiterační provázanosti populací jedinců a drobných chyb v konvergenci populace k hledanému optimálnímu řešení. Problém nebyl ani tak v obtížnosti takového úkolu jako v potřebné výpočetní době. Autor potřeboval přibližně 200 až 300 hodin čistého výpočetního času k odstranění chyb v optimalizačním algoritmu. Výše uvedené výsledky na obr. 51 až obr. 54 nepředstavují nejlepší nalezené řešení, každý běh odladěného algoritmu se stejnými parametry poskytl mírně jiné řešení podle toho, jak se vygenerovala počáteční populace jedinců. Uvedené konkrétní výsledky jsou však typickým příkladem výstupu algoritmu a poslouží pro srovnání níže.

Jakmile byl algoritmus odladěn, byl otestován efekt zdvojnásobení velikosti populace. Předpokládaný efekt byl minimálně zpřesnění řešení, což se potvrdilo. Řídící parametry této výpočetně náročnější varianty optimalizace jsou:

```
popSize = 10
maxNum = 3
maxCon = 4
maxQ = 2
maxStallGen = 10
quarNum = 4
```

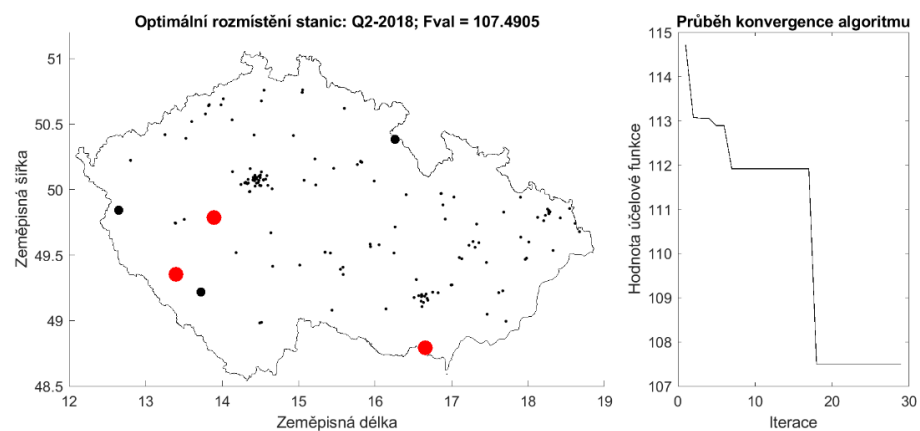
Výsledky této výpočetně složitější optimalizace jsou na obr. 55 až obr. 58.

Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Výkon individuálních připojení v kW	Počet konektorů
49,2183132082667	13,7215079470953	11776	1
		51200	1
		2560	2
		5888	1
49,8414003046929	12,6520602322013	240000	1
		15360	1
		32000	2
50,3820007038307	16,2607565793792	5888	1
		14720	1



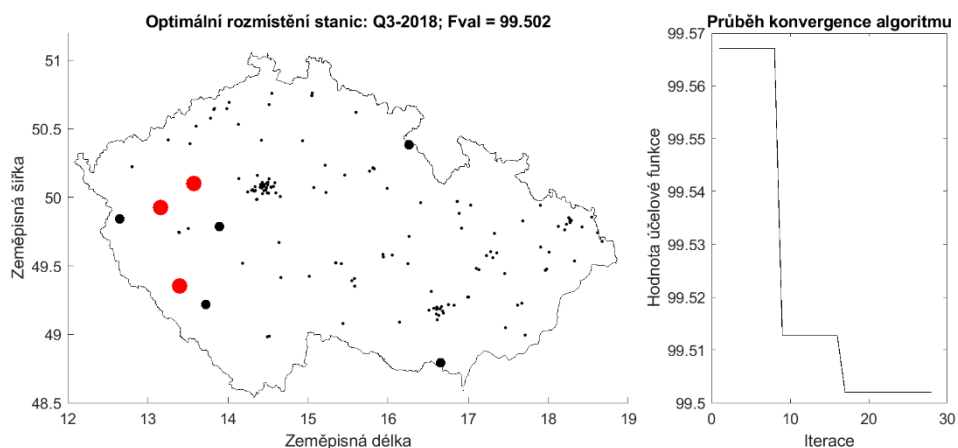
Obr. 55: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období ( $popSize = 10$ ), výsledek pro Q1/2018  
(Zdroj: vlastní zpracování)

Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Výkon individuálních připojení v kW	Počet konektorů
49,7855110980079	13,8945464660427	17664	2
		41600	2
		8320	2
48,7940087445832	16,6594514058111	14720	1
		240000	2
		23552	2
49,3514388721661	13,3948970773547	32000	2
		41600	2
		8320	2



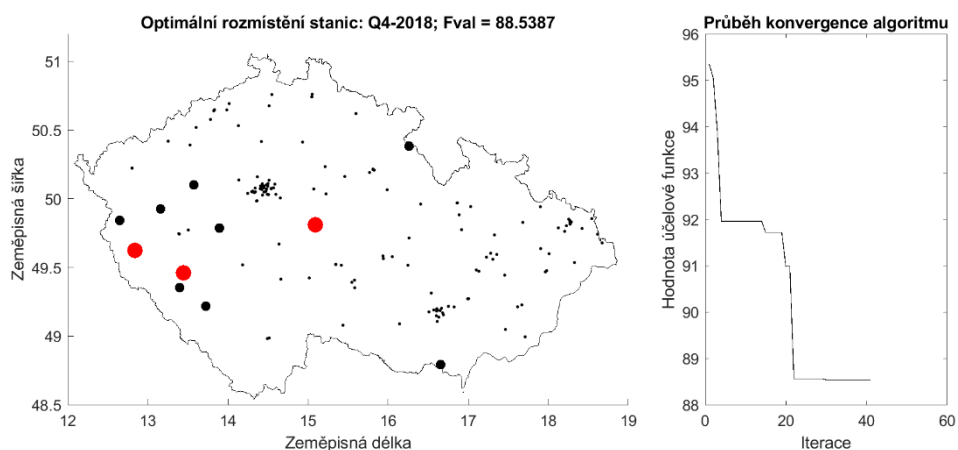
Obr. 56: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období ( $popSize = 10$ ), výsledek pro Q2/2018  
(Zdroj: vlastní zpracování)

Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Výkon individuálních připojení v kW	Počet konektorů
50,0991304013700	13,5734916454779	5120	2
49,9258769184007	13,1594942993115	240000	1
		20160	2
		5888	1



Obr. 57: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období (`popSize = 10`), výsledek pro Q3/2018  
(Zdroj: vlastní zpracování)

Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Výkon individuálních připojení v kW	Počet konektorů
49,4597730155639	13,4458498804911	51200	1
		5120	2
49,8110063499558	15,0905007692332	40000	2
		10240	1
		15360	1
		35328	1
49,6241559396345	12,8391252977187	5888	1



Obr. 58: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období (`popSize = 10`), výsledek pro Q4/2018  
(Zdroj: vlastní zpracování)

Přirozeně by měl navržený algoritmus mít takové vlastnosti, aby dokázal najít globální optimum vždy, při každém běhu. Takový požadavek je ovšem značně optimistický,



uvážíme-li praktické důsledky podoby účelové funkce. V kapitole 9.5 byla diskutována výpočetní náročnost účelové funkce metody zrychlení jejího výpočtu. Paralelizací na GPU bylo dosaženo několikanásobného zrychlení výpočtu, přesto však trvá ohodnocení jedné generace jedinců přibližně 2,5 až 3 minuty. To znamená, že získání výsledku pro základní varianty z obr. 51 až obr. 54 zabere přibližně 4 a 6 hodin v závislosti na tom, jak „šťastně“ se vygenerují počáteční populace a jak rychle je dosahováno hranice `maxStallGen` po sobě jdoucích stagnujících generací. Pro složitější variantu s dvojnásobnou populací je výpočet pochopitelně přibližně dvojnásobně pomalejší. K tomu uveďme, že například výsledky z obr. 55 až obr. 58 trvalo vypočítat 48480 sekund, což je přibližně 13,5 hodiny.

Schopnost najít globální optimum je závislá na výpočetním čase. Pokud necháme populaci geneticky transformovat déle, je větší šance, že bude nalezena lepší hodnota účelové funkce. Pokud zvýšíme počet jedinců, populace bude variabilnější, schopna nést více genetické informace a zaplnit hustěji prohledávaný prostor proměnných. Obě tyto opatření bychom mohli nazvat zvyšování přesnosti hrubou výpočetní silou.

Alternativní přístup ke zvyšování přesnosti vede k úpravě algoritmu CGA, buď k jeho modifikaci, nebo celkovému přepracování do vhodnější podoby, kdy by algoritmus byl schopen konvergovat ke globálnímu optimu (GO) rychleji. Základními požadavky na algoritmus takový algoritmus by byly:

- *Rychlost konvergence* ke GO,
- *Přesnost řešení*, tj. vzdálenost od GO.
- *Stabilita řešení*, tj. variabilita výsledků v různých bězích algoritmu.

Takováto modifikace však spadá do kategorie možných budoucích rozšíření popsanych v kapitole 10.3 a není součástí předkládané práce.

## 12 Ekonomické aspekty optimálního rozmístění stanic

Studie pojednávající o optimálním rozmístění nabíjecích stanic musí obsahovat alespoň krátký rozbor ekonomické stránky problému. Proto se nyní podívejme na aktuální možnosti vyčíslitelnosti nákladů na zřízení a provoz nabíjecí stanice, jakožto i na příjmy z poskytování nabíjecí služby, se kterými může potenciální investor počítat.

Nejprve uvedme, že podobně jako pro ostatní oblasti spojené s elektromobilitou, pro empirické posouzení smysluplnosti historických investičních záměrů nemáme dostatečná data, resp. nemáme dostatečně dlouhou časovou řadu těchto dat, jelikož doby návratnosti jednotlivých investičních záměrů jsou často delší než doba, po kterou je masová elektromobilita v dané oblasti rozšířena. Zároveň pro prostředí ČR tato data zcela chybí. Hodnoty můžeme odhadovat pouze ze zahraničních zdrojů, přičemž z hlediska dostupných analýz a dat budou tradičně nejzajímavější USA.

### 12.1 Časový aspekt business plánů

Literární zdroje, na kterých je tato kapitola postavena, pojednávají o ekonomických aspektech budování nabíjecí infrastruktury v řádu 10 let (nejstarší se vztahují k letům 2010 až 2011, nejnovější pak k roku 2018 s mírným výhledem do budoucnosti), přičemž jednotkou ceny v těchto studiích je americký dolar, případně euro. K tomu je nutné zmínit dvě poznámky.

Zaprvé, ekonomické kalkulace investičních záměrů se zpravidla počítají k aktuální cenové hladině, tj. aktuálnímu datu, kdy byla kalkulace prováděna / publikována. Protože však americký dolar i euro podléhají inflaci, je nutné při porovnávání dvou investičních záměrů z různých období brát v potaz změnu cenové hladiny mezi těmito obdobími. Zároveň však můžeme říct, že od roku 2010 až 2018 nepodléhala ani jedna z měn příliš silné inflaci, konkrétně, dolar se v tomto období znehodnotil přibližně o 15 % [217], euro pak o asi 10 % [218].

Druhý, a podstatně silnější vliv na ekonomickou kalkulaci však budou mít změny cen samotné nabíjecí infrastruktury, které souhrnně můžeme označit jako hardware. Tato technologie zažívala a stále zažívá dynamický rozmach a na trh se dostávají stále nové typy nabíjecího hardware. Jeho cena sice v průběhu času klesá s uplatňujícími se úsporami z rozsahu a s optimalizací celého výrobního procesu, ale nelze obecně tvrdit, že by toto snižování vedlo ke snižování ceny hardware v investičních záměrech. Důvodem je nutnost konstruovat konkurenceschopné business modely využívající modernější, rychlejší a spolehlivější hardware, který ovšem stojí stejně nebo dokonce více než původní hardware z doby před několika lety. Zkráceně řečeno, investiční záměry těží z technologického pokroku spíše zvyšování kvality poskytovaných služeb než snižování pořizovacích a provozních nákladů. Ovšem toto tvrzení opět neplatí obecně, jelikož záleží na konkrétním business plánu, kterou cestou se vydá. Konkurovat se dá jak cenou (a relativně zastaralým hardwarem), tak drahou cutting-edge technologií.

## 12.2 Příliš málo zkušeností

Jedním z prvních odborných článků, který se pokusil o uchopení problematiky business modelu veřejné nabíjecí služby, byl Schroederův článek z roku 2012 [219]. Článek obsahuje poměrně detailní souhrn parametrů jednotlivých typů nabíjecích stanic a jejich souvisejících nákladů, přičemž se drží standardního dělení na Level 2/Level 3, AC/DC a veřejné/domácí. Z hlediska zaměření práce nás budou zajímat především veřejné nabíjecí stanice a L3 typu a silnější verze L2 typu. Autoři se snaží vyčíslit zvláště operativní náklady a zvláště kapitálové náklady, přičemž celkové náklady na jednu stanic se pohybují v širokém rozmezí 10 tisíc eur až 125 tisíc eur podle typu stanice, přičemž je nutné si povšimnout, že jde o optimistické dolní hranice odhadů nákladů. Pesimistická varianta by byla v rozmezí 13 tisíc až 165 tisíc eur. Náklady jsou pak přepočítány na situaci, kdy by síť stanic obsluhovala 1 milion PEV, přičemž se zřejmě pracuje s variantou, že každé PEV požaduje homogenně 20 kWh a pravděpodobně se nabíjí tímto způsobem každý den. Celkové náklady na homogenní síť stanic (složené vždy z jediného typu stanice) jsou pak porovnatelnější a pohybují se v rozmezí od 0,4 do 1,4 mld. eur, přičemž realističtější je spíše horní hranice 1,0 až 1,4 mld. eur. Podotkneme, že autoři ve svých výpočtech pracují s životností stanice 10-15 let.

K celému článku je nutno říci následující. Z velmi omezených údajů té doby autoři sestavili racionální, realisticky se tvářící model, na kterém ukázali, že při současném stavu počtu elektromobilů na území Německa nejsou masivní investice do nabíjecí infrastruktury profitabilní. Zároveň však správně podotýkají, že stavba stanic je investice s velmi vágními odhady budoucích příjmů, ať jde o kladné či záporné hodnoty. Stanice na jedné straně může být hluboce ztrátová v případě, že se optimismus o rozmachu elektromobility nenaplní, na druhé straně může však být velmi zisková, kde příjmy poplynou nejen ze samotné prodané elektrické energie, ale i například z placeného parkování. Autoři v této souvislosti uvádějí denní poptávku 30 PEV na jedné stanici poptávající každý 20 kWh jako hraniční bod ziskovosti stanice. Současně však uvádějí, že náklady 95 tisíc euro na takovou stanic jsou příliš vysoké pro malé nezávislé investory. K tomu dodávají zevrubnou diskusi nad dílčími tématy silně ovlivňující budoucí zájem o nabíjení. Kromě běžné poptávky generované širokou veřejností se zabývají elektrifikovaných vozových parků institucí jakožto možného zdroje poptávky pro veřejné nabíjecí stanice, dále pak rozebírají různé typy tarifů a cenových schémat, jak z uživatelů stanic získávat příjmy a v neposlední řadě diskutují, jakými cestami je možné provozovatele nabíjecích stanic podpořit ze strany korporací poskytujících elektrickou energii (například odpuštěním poplatků na využívání rozvodné sítě).

Berme tedy tento článek jako kvalitně zpracovanou referenční studii o ekonomických aspektech nabíjecích stanic, která ovšem z důvodů nedostatku informací té doby a nesmírné složitosti vazeb zkoumaných business modelů neposkytuje více informací než prosté konstatování: „Nabíjecí infrastruktura je v současné době (2012) velmi rizikový projekt“.

Tematicky podobnou studii ze stejného období poskytuje He [220]. Na rozdíl od Schroedera se však zaměřuje na užší oblast a díky tomu ji může řešit mírně detailněji a přesněji. He například používá časový interval nabíjení realističtějších 8:00 až 17:00 hodin namísto Schroederových 24 hodin a zajímají ho striktně PHEV. Z práce není úplně zřejmé, proč právě PHEV jsou předmětem zkoumání, a jaké důsledky by se z článku daly vyvozovat pro PEV/BEV, nicméně takové je rozhodnutí autorů. Cílem stanic v tomto článku je maximalizovat denní zisk. Autoři nepracují s celým státem, ale pouze s oblastí čínského Pekingu, pro který modelují vývoj počtu elektromobilů. Z dnešního pohledu jsou jejich závěry úsměvné, model předpovídá, že v roce 2017 bude v Pekingu celkem 11487 hybridů, přičemž reálná data ukázala, že jen na rok 2017 bylo uvolněno čínskou vládou 51 tisíc registračních značek pro tamní elektromobily [221]. Výsledný model ROI pak naznačuje, že cena elektrické energie je téměř bezvýznamnou veličinou, která nemá na výslednou hodnotu ukazatele znatelný vliv. Ve skutečnosti, ze závěrů modelu plyne, že jedinou opravdu podstatnou veličinou je čas, což v podání autorů znamená počet provozovaných vozidel. Opět jako v předchozím případě, takové konstatování není zrovna konkrétním ekonomickým doporučením. Autoři v podstatě tvrdí, že „dokud nebudou na silnicích řádově stovky tisíc vozidel, stanice se nevyplatí budovat“.

Rozsáhlejší studii ze stejného období (2012) pak poskytují Chang et al [222]. Tato studie zkoumá více alternativních scénářů s různými parametry a zkoumá vlivy jednotlivých definovaných proměnných. Závěrem autoři poskytují doporučení zvláště pro poskytovatele nabíjecí služby a zvláště pro tvůrce legislativy, přičemž konstatují problém se ziskovostí komerčních nabíjecích stanic z důvodu nízkého počtu elektromobilů celkem a velkého podílu domácího nabíjení. Z toho důvodu jsou doporučovány poskytovatelům nabíjecí služby spíše nepřímé metody zvyšování ziskovosti, například pomocí „zeleného PR“, kdy je podpora elektromobility využita jako PR nástroj k propagaci hlavního podnikání firmy. Pro tvůrce legislativy je pak doporučováno zůstat u legislativní podpory elektromobility minimálně formou možnosti daňových odpočtů.

Jako cíl budoucího výzkumu je v citované práci stanoveno měření dopadu veřejných nabíjecích stanic na míru přijímání elektromobility. Rozšiřování nabíjecí infrastruktury je totiž podle autorů jeden ze způsobů, jak bojovat s *range anxiety*, což stále bývá označováno za jednu z hlavních příčin odmítání elektromobilů. Reflektujeme-li názory autorů s dnešními empirickými znalostmi, zdá se, že se autoři ve svých předpovědích příliš nemýlili. Skutečně, jak trend elektromobility postupuje světem ze zemí, které lze označit za průkopníky elektromobility, do ostatních zemí, problémy spojené s ranou fází jsou všude víceméně obdobné. Pochopitelně, existují výjimky, ale máme-li se zaměřit na země kulturně a ekonomicky podobné České republice, tedy země střední a východní Evropy, pak jsou námitky odpůrců elektromobility i problémy poskytovatelů infrastruktury víceméně identické.

Další práce je poměrně podrobným reportem z roku 2013 z USA [223]. Autoři se zaměřují na aktuální stav tamní nabíjecí infrastruktury, kde konstatují přibližně 8600 nabíjecích stanic (alternativní zdroje uvádějí až 9600 stanic) na celém území, přičemž přes 5000 je jen ve státě Kalifornie. Autoři se na těchto datech zamýšlejí nad rozdílností

jednotlivých států USA a souvisejícími bariérami v budování infrastruktury. Mezi nejvýznamnější patří „obtížné vytvoření ziskového businessu založeného na nabíjecích stanicích“ a „nákladné, složité, zpomalené a nestandardizované povolovací řízení k vybudování nabíjecí stanice“. Zároveň za bariéru považují nedostatek finančních pobídek, čímž myslí nedostatek investic pro samotné budování stanice, tak zřejmě i fakt, že jednou vybudovaná nabíjecí stanice nemusí být vůbec ziskovou investicí. Závěrem pak poskytují poměrně obsáhlý seznam doporučení pro tři zainteresované strany: jako v předchozím případě pro tvůrce legislativy, pro komerční zainteresované strany a pro tvůrce technologických standardů (jelikož ty považují rovněž za jednu z bariér). Mezi doporučeními se několik vztahuje přímo k ekonomickému hledisku. Například doporučují navázat vládní pobídky přímo na ukazatele ziskovosti investice do nabíjecí infrastruktury, nebo na pobídky související s doprovodnými technologiemi jako například generátory solární energie. Současně navrhuje obnovit možnosti daňových odpočtů pro soukromé a daňové nabíjecí stanice (které byly v předchozích letech zrušeny). Pro samotné investory pak navrhuje snahu o vytvoření ziskových business modelů, nicméně to asi nebude zrovna lehký úkol při dané úrovni poptávky. Ze studie tedy vyplývají opět stejná zjištění: a) komerčně ziskové investiční projekty je velmi obtížné formulovat, b) nedostatek nabíjecích stanic je klíčový pro uživatele elektromobilů při rozhodování o pořízení, c) jedna ze stran musí udělat „krok do neznáma“ a zariskovat jako první, aby se druhá strana přidala. Tento prvotní impulz by měl být v zájmu veřejného sektoru, potažmo vlády, která by jej měla moderovat chytře definovanými finančními pobídkami.

Z hlediska chronologického výčtu studií se v tomto momentě dostáváme do bodu počátku zpracovávání předkládané práce. Z toho plyne, že mnohé níže popisované studie a v nich obsažená fakta nebyla autorovi práce známa po část, nebo po většinu zpracovávání práce. Autor tyto zdroje sice průběžně sledoval, ale mohl je reflektovat pouze v dílčích částech práce. Nemohl například na jejich základě modifikovat celý koncept už rozpracované práce, tj. modulární optimalizační simulace s určitými vstupy a určitým metodologickým rámcem. To souvisí zejména s faktem, že čistě ekonomické hledisko je v optimalizačním modelu reflektováno poměrně abstraktně – jako poptávka a nabídka nabíjecí kapacity. Ziskovost jednotlivých stanic není konkretizována právě proto, že nabíjecí stanice zkrátka samy o sobě při dané úrovni poptávky a dané technologii (bráno pohledem z roku 2014-2015) ziskové nejsou. Nemělo tedy smysl vytvářet model, který by optimalizoval stanice na základě jejich ziskovosti. Jako mnohem realističtější se autorovi zdálo vytvoření modelu účelovou funkcí z kapitoly 9.4 založenou na jiných metrikách, která ovšem ziskovost přímo neobsahuje.

### **12.3 První empirické důkazy**

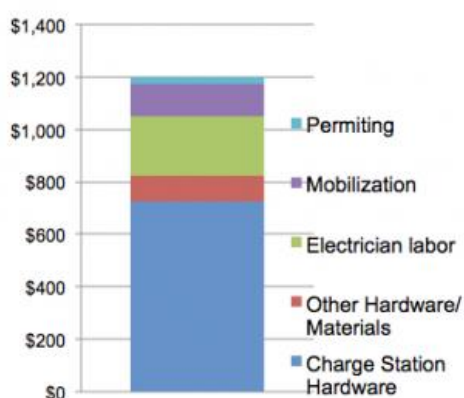
V odborném článku z roku 2014 [224] se autoři zaměřují na měření vlivu socioekonomických faktorů na přijímání elektromobility. Studie poskytuje vedle uvedených faktorů také značně podrobné srovnání stavu elektromobility ve vybraných zemích světa. I když tento výběr není vyčerpávající, Česká republika v něm je zahrnuta,

takže je možné si na základě této studie vytvořit dobrou představu o relativním stavu elektromobility v ČR ve sledovaném období. Autoři zjišťují, že mezi zkoumanými ekonomickými prediktory přijímání elektromobility jsou signifikantní celkem tři, všechny pozitivně korelující: a) finanční pobídky, b) počet nabíjecích stanic na obyvatele, c) přítomnost zařízení na výrobu elektromobilů. Z těchto tří má podíl PEV na celkovém počtu vozidel největší vliv b) počet nabíjecích stanic na obyvatele.

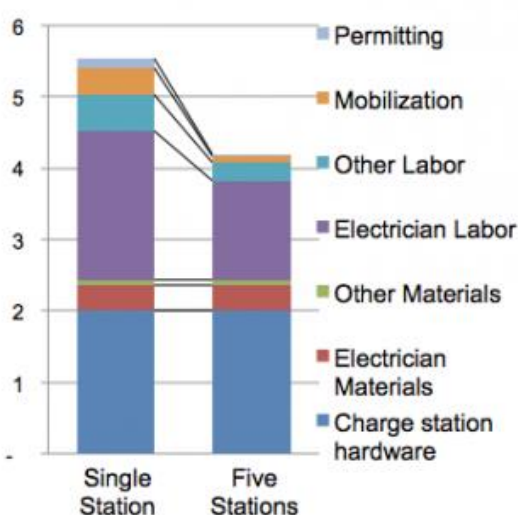
Když autoři testovali širší spektrum socioekonomických faktorů, které jsou obvykle označovány za významné z hlediska elektromobility, jako příjem, úroveň vzdělání a environmentalismus, tak shledali, že tyto ve skutečnosti nejsou příliš dobrými prediktory přijímání elektromobility. Tento rozpor vysvětlují velikostí PEV trhu, který považují za malý. V sekci doporučení se rovněž zmiňují o finančních pobídkách majitelům PEV, ale upozorňují, že kvůli výše řečeným závěrům, samotné finanční pobídky mají nižší sílu než rozvoj nabíjecí infrastruktury. Studie tedy opět potvrzuje nezastupitelnou významnost faktoru přítomnosti nabíjecí infrastruktury pro rozvoj elektromobility. Z ekonomického pohledu pak poskytuje srovnání míry pobídek mezi vybranými zeměmi, kde se tyto pohybují od prakticky nulových (např. ČR) až po registrační pobídky v hodnotě téměř 35 000 USD (Dánsko).

V článku z roku 2014 [225] se snaží autoři kompilovat několik různých zdrojů a poskytnout odpověď na otázku skutečných nákladů na PEV nabíjecí stanice. Uvažují náklady na stavbu čtyř variant stanice: 1) domácí soukromé stanice, 2) stanice ve veřejných garážích, 3) veřejná stanice volně stojící na ulici těsně u vozovky, 4) rychlá (DC) veřejná stanice volně stojící na ulici těsně u vozovky. Kalkulace nákladů jsou poměrně detailní, u některých variant dokonce s rozбором úspor z rozsahu, viz obr. 59.

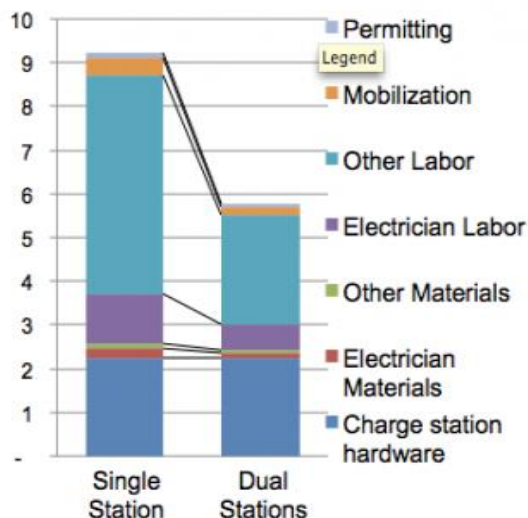
**Fig. 1: Home Charger Installation**  
Cost per charger



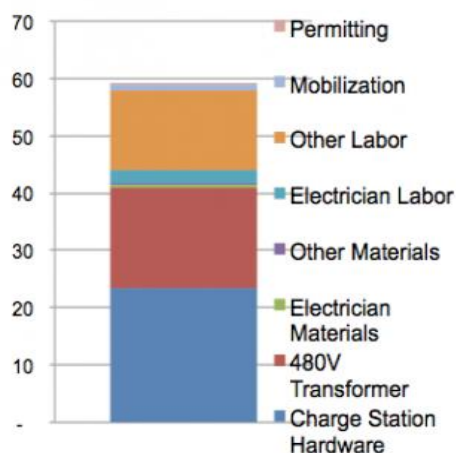
**Fig 2: Parking Garage Installation**  
Cost per charger, thousands USD



**Fig. 3: Curbside Installation**  
Cost per charger, thousands USD



**Fig. 4: Curbside DC Fast Charger Installation**  
Cost per charger, thousands USD



Obr. 59: Odhady nákladů na různé typy nabíjecích stanic; shora dolů a zprava doleva:  
1) domácí, 2) v garážích, 3) běžná na kraji silnice, 4) rychlá (DC) na kraji silnice  
(Zdroj: [225])

Autoři dále upozorňují, že vedle nákladů je nutné počítat s náklady údržby v hodnotě přibližně 300 USD pro varianty 1) až 3) a 1000 až 2000 USD pro variantu 4), které nebyly do uvedených grafů zahrnuty (zde není z článku jasné, o jaký typ údržby se jedná a jaký časový úsek je těmito náklady údržby pokryt). Z článku plyne a z grafů je patrné, že uvedené náklady jsou pouze jednorázovými pořizovacími náklady stanice. V částkách není zahrnuta například dlouhodobá údržba z hlediska materiálu nebo práce a nejsou zahrnuty náklady elektrické energie, které musí distributorovi energie pochopitelně platit provozovatel stanice, bez ohledu na jeho business model, kterým účtuje spotřebovanou energii zákazníkovi.

Správný business model je ostatně klíčový v otázce provozu nabíjecí stanice. Odvíjí se od něj vše, včetně nákladů, jelikož definuje, jaký typy stanic chce provozovatel zákazníkům poskytovat, tedy i jaký soubor nákladů z obr. 59 je pro něj relevantní. Finančně udržitelný business model se pokouší představit autoři studie z USA ze státu Washington [149]. Studie poskytuje velmi detailní rozbor provázaných vztahů mezi provozovatelem stanice a souvisejícími podnikatelskými aktivitami. Studie je obsahově příliš bohatá, aby bylo možné na tomto místě komentovat její konkrétní zjištění, ale pokud bychom měli její obsah shrnout, pak v zásadě autoři tvrdí, že přestože provoz nabíjecích stanic není sám o sobě ziskovou investicí, má vysoké pozitivní účinky na související podnikatelské aktivity. V zásadě je linka uvažování tato: podniky, které nabídnou u vlastních zařízení možnost nabíjení pro elektromobily, budou uživateli elektromobilů preferovány před podniky, které tuto možnost nenabízejí. Nabíjecí stanice u vlastní provozovny se stane konkurenční výhodou bez ohledu na odvětví, přičemž jak bude růst PEV trh, význam této konkurenční výhody se bude zvyšovat. Aby podniky

zůstaly konkurenceschopné, budou přistupovat na budování nabíjecích stanic, což povede ke zvyšování jejich počtu i přesto, že samy nabíjecí stanice nebudou ziskovou investicí. Ziskovost opatření „vybudování stanice“ bude způsobena dodatečnými příjmy z hlavní činnosti podnikání tím, jak budou zákazníci dodatečně získáni od konkurence.

Těžko dnes soudit, jak tento proces skončí, ale můžeme racionálně předpokládat, že tento očekávaný konkurenční boj v budování stanic jednou ustane, jakmile budou stanice dostupné prakticky u všech účastníků trhu. Pak přestane být vlastnění nabíjecí stanice u své provozovny konkurenční výhodou a stane se standardem, který budou zákazníci po podnicích v daném odvětví vyžadovat. Výše zmíněná studie pak poskytuje množství kalkulací různých scénářů toho, jak rozpočítat dodatečné příjmy z hlavní podnikatelské činnosti na pokrytí nákladů na stavbu a údržbu nabíjecí stanice.

Pro Českou republiku je velmi obtížné najít studie, které by ekonomickou atraktivitu budování nabíjecích stanic zhodnocovaly z lokálního hlediska této středoevropské země. Překvapivě kvalitní je ovšem diplomová práce z roku 2016 zabývající se ekonomickou efektivitou elektromobility právě pro ČR [226]. Autor pracuje s pěti různými business modely, které aplikuje na situace v ČR, Slovensku, Německu, Rakousku, Irsku a EU jako celku. Rozhodujícím ukazatelem autorových analýz je čistá současná hodnota různých alternativ. Autor představuje model, ve kterém předpokládá přibližně 30 % podíl rychlých DC stanic a 70 % pomalejších AC stanic. Konkrétně pak uvažuje instalaci 41 DC stanic a 68 AC stanic v celkové hodnotě materiálu asi 1,5 mil. EUR, přičemž náklady na instalaci předpokládá dalších zhruba 0,7 mil. EUR. Dále uvádí několik typů variabilních nákladů jako cena spotřebované elektřiny, údržba, pronájem stavební parcely, IT a administrativní režie. Podotkněme, že autor čerpá informace od aktuálního lídra na trhu – skupiny ČEZ. V článku [227] si můžeme tyto částky zhruba ověřit, jelikož samotný ČEZ na svém webu uvádí podobná čísla pro projekt obdobného rozsahu. Z hlediska odhadovaných počtů stanic pak poukažme na prezentaci vládní studie z roku 2017 [128], kde se autoři snaží zodpovědět otázku „kolik veřejných stanic je potřeba“.

Z těchto vstupů je pak vytvořen model čisté současné hodnoty a ten je aplikován na všechny sledované země. Závěrem dochází autor citované práce ke zjištění, že pro pozitivní i negativní scénář pracující s různou úrovní poptávky je čistá současná hodnota takové investice záporná pro ČR a Slovensko a kladná pro Rakousko a Irsko. Německo a EU jako celek se pohybuje kolem nulové ČSH v závislosti na typu varianty. ČSH investice je pro ČR -1,6 až -3,6 mil. EUR, což je hodnota z hlediska původní investované sumy naprosto neakceptovatelná. Pochopitelně tato zjištění jsou způsobena faktem, že autor uvažuje o jednorázovém masivním nasazení veřejných dobíjecích stanic v době, kdy v ČR je počty elektromobilů v řádu stovek až nízkých jednotek tisíců, a navíc na veřejných místech jich dobíjí jen zlomek z nich. Tento model ovšem reprezentuje metodologický postup, kterým by bylo možné předkládaný optimalizační model obohatit, jestliže by bylo primárním smyslem stavby nabíjecích stanic tvořit přímo generovaný zisk, potažmo až by generování zisku čistě poskytováním nabíjecí služby bylo možné. Ostatně samotný ČEZ s postupem času mění způsob, jakým účtuje zákazníkům použití své nabíjecí infrastruktury [228].



Na tomto místě je vhodné zmínit důsledek takového výsledku ekonomické kalkulace na podobu optimalizačního modelu. Fakt, že nabíjecí infrastruktura pravděpodobně nebude zisková při pilotní fázi rozvoje elektromobility, ve kterém se ČR aktuálně nachází, byl autorovi znám již při konceptuálním návrhu modelu. Autor proto uvažoval, že zavedení konkrétních ekonomických metrik do optimalizačního modelu by jednoduše nedávalo smysl. Ekonomické ukazatele obsahující model (model, jehož cílem je maximalizovat ekonomickou výkonnost investice) by se snažil minimalizovat ekonomické ztráty místo toho, aby optimálně distribuoval stanice. Například, pokud bychom se takového modelu zeptali, kolik ztrátových stanic máme na území vytvořit, odpověděl by nám, že žádnou – pokud nic nepostavíme, nepřijdeme o žádné peníze. Pokud bychom přesto trvali na realističtější odpovědi a nastavili model, že minimálně může umístit řekněme 3 stanice různé nabíjecí kapacity, aby nabíjecí síť přece jen rostla, pak by model odpověděl, že nejlepší je umístit 3 co nejslabší, tedy nejlevnější stanice, aby opět minimalizoval ekonomické ztráty. Tyto slabé stanice by snad byly vhodné z pohledu ekonomických ukazatelů, ovšem pro uživatele vozidla prakticky nepoužitelné. Realistické cestovní situace popsané v kapitole 4.4.3 by nebyly uskutečnitelné, protože uživatel by nebyl ochoten čekat dlouhé hodiny u velmi pomalé stanice na to, až bude moci opustit místo vně své domácí service area a vrátit se domů. Stejně tak, jak ukazuje kapitola 8.4, čím déle bude trvat samotný čas nabíjení, tím později po plném nabití bude uživatel s tímto vozidlem odjíždět. To způsobí neproporcionální blokaci nabíjecího místa, a tak ještě sníží reálnou nabíjecí kapacitu stanice.

Následující tiskové zprávy z poslední doby pak jen dokreslují celou situaci. Článek [229], resp. jeho zdroj [230] z konce roku 2017 předpovídají, že čistý zisk bude infrastruktura v USA generovat až po roce 2025, přičemž výrazné zisky budou z infrastruktury plynout až po roce 2035. Do kalkulací ovšem zahrnují i přínos ze snížení emisí skleníkových plynů. Průběžně aktualizovaný článek [231], autorovi známý z poloviny roku 2018, se snaží poskytnout přehled domácí nabíjecí infrastruktury, která je aktuálně na trhu. Z nákladů na pořízení je vidět, že se infrastruktura za posledních 5 let nejen podstatně zlevnila, ale současně jsou dostupné produkty v kvalitě dříve určené pouze pro komerční využití. Podle uvedených částek je zřejmé, že rychlou stanici (Level 3) lze pořídit v rozmezí 4000 až 8000 USD. Článek [232] z jara 2018 pak situaci dokresluje a poskytuje čtenáři návod, jaké jsou v USA příležitosti nabíjení včetně tarifů, jejich cen a počtu dostupných míst. Ve stejném období pak vyšel analogicky pojatý článek pojednávající o situaci v ČR [233].

## 12.4 Shrnutí ekonomického pohledu

Máme-li nyní okomentovat roli ekonomického aspektu v optimalizačním modelu, je třeba zaměřit se na jeho smysl. Deklarovaným smyslem optimalizačního modelu je najít takové rozmístění stanic v průběhu času a prostoru, aby nabíjecí infrastruktura rostla společně s počty provozovaných elektromobilů. Důvodem tohoto záměru je empiricky doložená skutečnost, že růst existence nabíjecí infrastruktury je podmínkou poptávky po elektromobilech a naopak, že vlastnictví elektromobilů je důvodem, proč jsou investoři

ochotni infrastrukturu budovat. Toto obousměrné působení tedy znamená, že buď se obě strany společně hýbou, nebo obě strany stagnují. Jelikož však tyto dvě skupiny (skupina uživatelů elektromobilů a skupina poskytovatelů nabíjecí služby) nejsou společně organizované, musí jedna z nich udělat z časového pohledu riskantní první krok, aby se druhá mohla přidat. Jedincem skupiny uživatelů elektromobilů je zpravidla fyzická osoba, a naopak jedincem skupiny poskytovatelů nabíjecí služby je zpravidla právnická osoba. Osoba právnická je z hlediska schopnosti podstupovat a nést riziko mnohem způsobilější než osoba fyzická a bude tedy ochotněji riskovat. Z toho důvodu lze očekávat, že to budou právě poskytovatelé nabíjecí služby, kteří udělají onen první krok a začnou budovat nabíjecí infrastrukturu, i když na daném území ještě není tolik zákazníků, aby byla jejich investice zisková. Potenciální zákazníci, fyzické osoby, pak na tento stav přistupují a jsou ochotnější pořídit si elektromobil v prostředí, kde nebudou nuceni podstupovat riziko, že jej po pořízení nebude možné plně využívat.

Tato kapitola demonstruje na několika případech, že skutečně k takovému procesu docházelo a dochází na mnoha místech světa. V případě zemí jako USA, Německo, Norsko, Nizozemsko a obecně zemí západní Evropy je stav v roce 2018 v takové fázi, že původní investice se stávají ziskovými a nové, správně umístěné investice potenciálně také. Česká republika však ještě nedosahuje této druhé fáze, kdy zákazníci reagují v masivní míře zvýšenou poptávkou po elektromobilech na existující infrastrukturu. Jedním z důvodů může být stále subjektivní pocit, že na daném území je nedostatečný počet nabíjecích stanic, dalšími důvody pak pochopitelně nižší kupní síla českých zákazníků, relativně vysoké pořizovací náklady bez možnosti výraznějších daňových odpočtů a eventuálně i nižší zájem o elektromobil jako o alternativní produkt ke konvenčnímu automobilu.

Z těchto důvodů je v této fázi přijetí elektromobility v České republice otázka návratnosti investice irelevantní – investice bude dnes prakticky vždy ztrátová. Cílem modelu proto není rozmisťovat stanice ziskově, ale tak, aby výsledná nabíjecí infrastruktura co nejlépe uspokojovala poptávku po nabíjecí službě a uživatelé současní, a i potenciálně budoucí, měli pocit, že technické bariéry pořízení elektromobilu v ČR buď neexistují, nebo jsou přijatelně nízké. Míra uspokojování poptávky je pak chápána komplexně a blíže ji popisuje kapitola 9.

## Závěr

Problematika rozmístování nabíjecí infrastruktury je pro Českou republiku aktuální téma. Úroveň elektromobility v zemi ještě není na takové úrovni, jaká je v USA, západní Evropě nebo například Číně. Mnozí namítnou, že takto je to správně, že bychom se do masového zavádění elektromobilů vůbec pouštět neměli. Faktem ovšem zůstává, že jako členové Evropské unie jsme se v minulosti k této ekologické myšlence zavázali.

Vizionářská myšlenka elektromobility jako nového standardu v osobní pozemní dopravě nemusí být redukována na hádky mezi odpůrci poukazujícími na její zřejmé nedostatky a jejími příznivci. Elektromobil lze chápat ryze pragmaticky, jako nový produkt aspirující stát se možnou alternativou ke stroji, který po sto let definoval status quo v daném odvětví. Jistě, taková alternativa není pro každého a přiznejme si, že nový produkt nemusí být superiorní vůči předchůdci v každém ohledu. Pokud se však najdou lidé, kteří o tuto alternativu přes její nedostatky mají zájem a jsou ochotni si ji pořídit a provozovat, neodrazuje je.

Ovšem provoz takového nového produktu – elektromobilu – s sebou nese požadavek na infrastrukturu. Před přibližně 20 lety se začala budovat napříč zemí počítačová síť, která umožnila běžným uživatelům připojit se k Internetu a využívat služby, které dnes považujeme za samozřejmé. Podobně je to i s infrastrukturou pro elektromobily. Ta se naštěstí nemusí budovat celá, stačí nově vznikající zařízení napojit na existující silovou síť. Kde konkrétně ovšem veřejná nabíjecí místa vytvořit, to je otázka s mnohem méně zřejmou odpovědí.

Předložená disertační práce se pokouší na tuto otázku poskytnout odpovědi, přičemž se na problematiku snaží dívat ekonomickým pohledem. Poskytuje matematický model zachycující protichůdné požadavky tržních subjektů, který umožňuje nalézt určité řešení i tam, kde čistá ekonomická kalkulace není příliš použitelná. Model simuluje v čase probíhající růst zájmu o elektromobilitu, měnící se požadavky na nabíjení během dne, růst nabídky dostupných nabíjecích míst, interakci vozidel a stanic na úrovni jednotlivých nabíjecích událostí a výsledek iterativního přidávání stanic v čase. Smyslem modelu je najít takové rozmístění stanic, aby pokrytí nabíjecí službou v ČR rostlo spolu s požadavky uživatelů. Model je určen pro jakýkoliv subjekt, který má zájem o mapování stavu, predikci nebo modelování vztahu mezi elektromobily a nabíjecími stanicemi. Autor doufá, že předkládaná práce spolu s doprovodným modelem v jazyce MATLABu dobře poslouží zájemcům z řad průmyslu, vědy a výzkumu.

## Seznam použitých zkratk

ABC – algoritmus umělé včelí kolonie (Artificial Bee Colony algorithm)

AHP – analytický hierarchický proces, optimalizační metoda (Analytical Hierarchic Process)

BSS – stanice na výměnu baterií v elektromobilech (Battery-Swapping (-Switching) Station)

BSSPP – problém rozmístění stanic na výměnu baterií v elektromobilech (Battery-Swapping (-Switching) Station Placement Problem)

CE – optimalizační metoda křížové entropie (Cross Entropy)

CNG – stlačený zemní plyn (Compressed natural gas)

COO – formát reprezentace řídkých matic v počítači (Coordinate List matrix format)

CRO – optimalizace pomocí simulace chemických reakcí (Chemical Reaction Optimization)

CSC – formát reprezentace řídkých matic v počítači (Compressed Sparse Column matrix format)

CSPP – problém optimálního rozmístění nabíjecích stanic (nabíjecí infrastruktury) (Charing Station Placement Problem)

ČTK – Česká tisková kancelář

DEA – optimalizační metoda, nepřekládá se (Data Envelopment Analysis)

DG – distribuované generování energie, distribuované generátory (Distributed (Electricity) Generation / Distributed Generators)

EU – Evropská unie (European Union)

FCV (FCEV) – vozidlo poháněné palivovými články (Fuel Cells (Electric) Vehicle)

GA – genetický algoritmus (Genetic Algorithm)

HEV – hybridní elektromobil s interním zdrojem elektrické energie (Hybrid Electric Vehicle)

HGA – hybridní genetický algoritmus (Hybrid Genetic Algorithm)

HICEV – vozidlo s vnitřním spalovacím motorem poháněné spalováním vodíku (Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle)

IPSO – vylepšená optimalizace pomocí algoritmu rojení částic (Improved Particle Swarm Optimization)

L1 – typ nabíjecí stanice (Level 1 charging station)

L2 – typ nabíjecí stanice (Level 2 charging station)

L3 – typ nabíjecí stanice (Level 3 charging station)

LNG – zkapalněný zemní plyn (Liquefied natural gas)

LP – lineární programování (Linear Programming)

MGA – vícekritériální genetický algoritmus (Multiobjective Genetic Algorithm)

MIP – smíšené celočíselné programování, smíšený celočíselný program (Mixed Integer Programming)

MILP – smíšené celočíselné lineární programování, smíšený celočíselný lineární program (Mixed Integer Linear Programming)

MINLP – smíšené celočíselné nelineární programování, smíšený celočíselný nelineární program (Mixed Integer Non-Linear Programming)

MPCC – matematický problém s podmínkami komplementarity (Mathematical Program with Complementarity Constraints)

NaN – nečíslo, druh proměnné v počítači (Not a Number)

NAP CM – Národní akční plán čisté mobility (National Action Plan of Clean Mobility)

NEP – problém nazelení rovnováhy v síti (Network Equilibrium Problem)

NEV – vozidlo využívající nové zdroje energie (New Energy Vehicle)

NGV – vozidlo poháněné zemním plynem (Natural Gas Vehicle)

NHTS – americká instituce zajišťující sběr dat o uživatelích vozidel v USA, nepřekládá se (National Household Travel Survey (USA))

PCSA – problém alokace veřejných nabíjecích stanic pro elektromobily (Public Charging Station Allocation Problem)

PEV – elektromobil s externím zdrojem elektrické energie (Plug-in electric vehicle)

PHEV – hybridní elektromobil s externím zdrojem elektrické energie (Plug-in hybrid electric vehicle)

PSO – algoritmus rojení částic (Particle Swarm Optimization)

RMSE – druh aproximační chyby, nepřekládá se (Root Mean Squared Error)

SA – specifická oblast v problému CSPP, viz příslušná kapitola, nepřekládá se (Service Area)

TAZ – zóny analýzy dopravy (Traffic Analysis Zone)

VRP – optimalizační problem, nepřekládá se (Vehicle Routing Problem)

## Bibliografie

- [1] PUGLIESE, Tony. Environment drives growth in EV sales in Asia. *Just Auto* [online]. Bromsgrove, United Kingdom: Aroq, 2016 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: [https://www.just-auto.com/comment/environment-drives-growth-in-ev-sales-in-asia\\_id166251.aspx](https://www.just-auto.com/comment/environment-drives-growth-in-ev-sales-in-asia_id166251.aspx)
- [2] JANÍČEK, Přemysl. *Systémová metodologie: brána do řešení problémů*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014, 1 sv. (různé stránkování) : il. ISBN 978-80-7204-887-8.
- [3] JAFFE, Eric. Where Electric Vehicles Actually Cause More Pollution Than Gas Cars. *CityLab* [online]. New York: CityLab, 2015 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.citylab.com/environment/2015/06/where-electric-vehicles-actually-cause-more-pollution-than-gas-cars/397136/>
- [4] SLOWIK, Peter a Nic LUTSEY. Expanding the electric vehicle market in U.S. cities. *The International Council of Clean Transportation* [online]. Washington, USA: International Council on Clean Transportation, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.theicct.org/publications/expanding-electric-vehicle-market-us-cities>
- [5] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, . Global EV Outlook 2017: Two million and counting. *International Energy Agency* [online]. France: IEA Publications, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf>
- [6] COBB, Jeff. Top Six Plug-in Vehicle Adopting Countries – 2015. *Hybrid Cars* [online]. Toronto, Canada: VerticalScope Inc., 2016 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybridcars.com/top-six-plug-in-vehicle-adopting-countries-2015/>
- [7] SHAHAN, Zachary. US Large Luxury Car Sales. *EVObsession* [online]. Important Media: Important Media, 2016 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://evobsession.com/tesla-model-s-1-in-large-luxury-car-market-in-us-in-2015/>
- [8] INSIDE EVS, . Monthly Plug-in Sales Scorecard. *Inside EVs* [online]. Inside EVs: Inside EVs, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://insideevs.com/monthly-plug-in-sales-scorecard/>

- [9] LOVEDAY, Steven. December 2017 Plug-In Electric Vehicle Sales Report Card. *Inside EVs* [online]. Inside EVs: Inside EVs, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://insideevs.com/december-2017-plugin-electric-vehicle-sales-report-card/>
- [10] SHEPARD, Scott, Sam ABUELSAMID a Lisa JERRAM. Market Data: EV Market Forecasts: Global Forecasts for Light Duty Plug-In Hybrid and Battery EV Sales and Populations: 2017-2026. *Navigant Research* [online]. Colorado, USA: Navigant Research, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.navigantresearch.com/research/market-data-ev-market-forecasts>
- [11] MOTOR INTELLIGENCE, . Auto Sales. *Wall Street Journal* [online]. New York, USA: Wall Street Journal, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: [http://www.wsj.com/mdc/public/page/2\\_3022-autosales.html](http://www.wsj.com/mdc/public/page/2_3022-autosales.html)
- [12] BRUCE, Chris. All gas stations in Russia will have to install EV charging stations. *Auto Blog* [online]. Birmingham, United Kingdom: Auto Blog, 2015 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.autoblog.com/2015/09/09/all-gas-stations-in-russia-will-have-to-install-ev-charging-stat/?guccounter=1>
- [13] COBB, Jeff. Why Europe Has Passed the US As Number One In Plug-in Electrified Vehicles. *Hybrid Cards* [online]. Toronto, Canada: VerticalScope Inc., 2015 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybridcars.com/why-europe-has-passed-the-us-as-number-one-in-plug-in-electrified-vehicles/>
- [14] SHAHAN, Zachary. Electric Cars Now = 23% of New Car Sales in Norway. *EVObsession* [online]. EVObsession: Sustainable Enterprises Media Inc., 2015 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://evobsession.com/electric-cars-now-23-of-new-car-sales-in-norway/>
- [15] *EV Norway* [online]. Oslo, Norway: Norsk Elbilforening, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://elbil.no>
- [16] LINDQUIST, Kathy a Michel WENDT. Electric Vehicle Policies, Fleet, and Infrastructure: Synthesis. *Washington State Department of Transportation* [online]. Washington, USA: Washington State Department of Transportation, 2011 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.wsdot.wa.gov/NR/rdonlyres/5559AE0E-8AB5-4E6B-8F8B-DEAA7ECE715D/0/SynthesisEVPoliciesFleetandInfrastructureFINALRev112911.pdf>
- [17] ACEA, . Overview of Purchase and Tax Incentives for Electric Vehicles in the EU in 2015. *European Automobile Manufacturers Association* [online]. Brussels, Belgium: ACEA, 2015 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: [http://www.acea.be/uploads/publications/Electric\\_vehicles\\_overview\\_2015.pdf](http://www.acea.be/uploads/publications/Electric_vehicles_overview_2015.pdf)



- [18] MOCK, Peter a Zifei YANG. Driving electrification: A global comparison of fiscal policy for electric vehicles. *The International Council on Clean Transportation* [online]. Berlin, Germany: ICCT, 2014 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.theicct.org/publications/driving-electrification-global-comparison-fiscal-policy-electric-vehicles>
- [19] *European Automobile Manufacturers Association* [online]. Brussels, Belgium: European Automobile Manufacturers Association, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.acea.be/>
- [20] ACEA, . Passenger Car Fleet by Fuel Type. *European Automobile Manufacturers Association* [online]. Brussels, Belgium: ACEA, 2015 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.acea.be/statistics/tag/category/passenger-car-fleet-by-fuel-type>
- [21] VORRATH, Sophie. Australians aren't buying electric cars: Three charts illustrate why. *Renew Economy* [online]. Mullumbimby, Australia: Renew Economy, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://reneweconomy.com.au/australians-arent-buying-electric-cars-three-charts-illustrate-why-78101/>
- [22] PEFAUR, C. Renault tests 100% electric cars in country. *Buenos Aires Herald* [online]. Buenos Aires, Argentina: Buenos Aires Herald, 2014 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://www.buenosairesherald.com/article/163947/renault-tests-100-electric-cars-in-country>
- [23] ROWE, Walker. Chinese Manufacturers Focus on South America's Emerging Market. *China US Focus* [online]. Hong Kong: Southern Pacific Review, 2014 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.chinausfocus.com/finance-economy/chinese-manufacturers-focus-on-south-americas-emerging-market/>
- [24] SHAHAN, Zachary. "Interesting" South Africa Electric Car Sales. *EVObsession* [online]. EVObsession: Sustainable Enterprises Media, 2015 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://evobsession.com/interesting-south-africa-electric-car-sales/>
- [25] *CleanTechnica* [online]. Clean Technica: Sustainable Enterprises Media, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/>
- [26] PONTES, Jose. 2017 China Electric Car Sales Blow World Out Of The Water - BAIC EC-Series Is A Superstar. *CleanTechnica* [online]. CleanTechnica: Sustainable Enterprises Media, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2018/01/29/2017-china-electric-car-sales-blow-world-water-baic-ec-series-superstar/>

- [27] *EV-volumes.com: The Electric Vehicle World Sales Database* [online]. Sweden: EV-volumes.com, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.ev-volumes.com/>
- [28] VAUGHAN, Adam. Electric and plug-in hybrid cars whiz past 3m mark worldwide. *The Guardian* [online]. London, United Kingdom: The Guardian, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/environment/2017/dec/25/electric-and-plug-in-hybrid-cars-3m-worldwide>
- [29] NAVIGANT RESEARCH, . Annual Sales of Electric Vehicles in North America, Western Europe, and Asia Pacific Will Reach 1.8 Million by 2023. *Navigant Research* [online]. Colorado, USA: Navigant Consulting, 2014 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <https://www.navigantresearch.com/newsroom/annual-sales-of-electric-vehicles-in-north-america-western-europe-and-asia-pacific-will-reach-1-8-million-by-2023>
- [30] NAVIGANT RESEARCH, . Electric Vehicle Market Forecasts. *Navigant Research* [online]. Colorado, USA: Navigant Consulting, 2015 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.navigantresearch.com/research/electric-vehicle-market-forecasts>
- [31] *Národní akční plán čisté mobility (NAP CM)*. In: . Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015, ročník 2015, číslo 1. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/cista\\_mobilita\\_seminar/\\$FILE/SOPSZP-NAP\\_CM-20160105.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/cista_mobilita_seminar/$FILE/SOPSZP-NAP_CM-20160105.pdf)
- [32] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/94/EU*. In: . Brusel: Evropský parlament, 2014, ročník 2014, číslo 1. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32014L0094>
- [33] HYBRID.CZ, . Ministerstvo dopravy podpoří budování sítí rychlodobíjecích stanic. *Hybrid.cz* [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/ministerstvo-dopravy-podpori-budovani-siti-rychlodobijecich-stanic>
- [34] *Dopravní politika ČR pro období 2014 – 2020 s výhledem do roku 2050*. In: . Praha: Ministerstvo dopravy, 2013, ročník 2013, číslo 1. Dostupné také z: <https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Strategie/Dopravni-politika-a-MFDI/Dopravni-politika-CR-pro-obdobi-2014-2020-s-vyhled/Dopravni-politika-CR-2014-%E2%80%93-2020.pdf.aspx>
- [35] *Státní politika životního prostředí České republiky 2012 - 2020*. In: . Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2012, ročník 2012, číslo 1. Dostupné také z:

[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news\\_130108\\_Statni\\_politika\\_zivotniho\\_prostredi/\\$FILE/SP%C5%BDP\\_2012-20.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news_130108_Statni_politika_zivotniho_prostredi/$FILE/SP%C5%BDP_2012-20.pdf)

- [36] SVAZ DOVOZCŮ AUTOMOBILŮ, . Grafy a tabulky ke statistice vozidel registrovaných v ČR v roce 2017. *Svaz dovozců automobilů* [online]. Hradec Králové: RTV data, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: [http://portal.sdacia.cz/clanky/download/2018\\_01\\_tiskovka-pdf-2017-12.pdf](http://portal.sdacia.cz/clanky/download/2018_01_tiskovka-pdf-2017-12.pdf)
- [37] *Hybrid.cz* [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne, 2018, 13(1) [cit. 2018-05-30]. ISSN 1802-5323. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/>
- [38] OENERGETICE.CZ, . Elektromobilita. *Oenergetice.cz* [online]. Česká republika: Oenergetice.cz, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektromobilita/>
- [39] *ZDopravy.cz: Elektromobilita* [online]. Praha: Avizer Z, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://zdopravy.cz/category/automobily/elektromobilita/>
- [40] *EcoFuture: Energie pro budoucnost* [online]. Česká republika: E.ON, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.ecofuture.cz/kategorie/e-mobilita>
- [41] *Emobilita* [online]. Česká republika: ČEZ, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.elektromobilita.cz/>
- [42] *EVObsession* [online]. Sustainable Enterprises Media: Sustainable Enterprises Media, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://evobsession.com/>
- [43] *CleanTechnica* [online]. Sustainable Enterprises Media: Sustainable Enterprises Media, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/>
- [44] *InsideEVs* [online]. InsideEVs.com: Motorsport Network, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://insideevs.com/>
- [45] *Charged EVs* [online]. Newcastle, United Kingdom: Isentropic Media, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://chargedevs.com/>
- [46] *Elctrek* [online]. elctrek.co: elctrek, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://electrek.co/>
- [47] *Wired: Electric vehicles* [online]. New York, USA: Wired, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.wired.com/tag/electric-vehicles/>
- [48] *ACEA* [online]. Brussels, Belgium: European Automobile Manufacturers Association, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.acea.be/>

- [49] HOŘČÍK, Jan. ABB představuje rychlonabíjecí stanice pro elektromobily. *Hybrid.cz* [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne, 2010 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/novinky/abb-predstavuje-rychlona-bijeci-stanice-pro-elektromobily>
- [50] EV VOLUMES, . Global Plug-in Sales for Q1-2018. *EV Volumes* [online]. Sweden: EV Volumes, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>
- [51] HOŘČÍK, Jan. Rok 2017 v číslech: prodej elektroaut v USA dosáhl 200 000. *Hybrid.cz* [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/rok-2017-v-cislech-prodej-elektroaut-v-usa-dosahl-200-000>
- [52] CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU, . Česko v pohybu: První celostátní průzkum dopravního chování. *Česko v pohybu* [online]. Brno: Centrum dopravního výzkumu, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.ceskovpohybu.cz/>
- [53] SHAHAN, Zachary. Over 2,000 EV Drivers From 28 Countries Tell Us What They Require & Desire: CleanTechnica's 2nd EV Report!. *CleanTechnica* [online]. Sustainable Enterprises Media: Sustainable Enterprises Media, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2017/05/03/2000-ev-drivers-28-countries-tell-us-require-desire-cleantechnicas-2nd-ev-report/>
- [54] OENERGETICE.CZ, . Infografika: 40 % Čechů by při nákupu auta volilo alternativní pohon: Nejdříve ale musí zlevnit. *Oenergetice.cz* [online]. Česká republika: Oenergetice.cz, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/cista-mobilita/infografika-40-cechu-by-pri-nakupu-auta-volilo-alternativni-pohon-nejdrive-musi-zlevnit/>
- [55] OENERGETICE.CZ, . Bloomberg: Elektromobily budou od roku 2025 levnější než automobily se spalovacími motory. *Oenergetice.cz* [online]. Česká republika: Oenergetice.cz, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/bloomberg-elektromobily-budou-od-roku-2025-levnejsi-nez-automobily-fosilni-paliva/>
- [56] SŮRA, Jan. První elektrická škodovka vyjede v roce 2020: Vyrábět se bude v Mladé Boleslavi. *ZDopravy.cz* [online]. Česká republika: Impresum, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://zdopravy.cz/prvni-elektricka-skodovka-vyjede-v-roce-2020-vyrabet-se-bude-v-mlade-boleslavi-4472/>
- [57] HYBRID.CZ, . Němci loni zaplatili za problémy rozvodné sítě skoro miliardu eur. *Hybrid.cz* [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne, 2018 [cit. 2018-05-25].

Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/nemci-loni-zaplatili-za-problemy-rozvodne-site-skoro-miliardu-eur>

- [58] E15.CZ, . Německá síť nestíhá. Náklady na regulaci výkyvů loni dosáhly miliardy eur Více na <http://zpravy.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/nemecka-sit-nestiha-naklady-na-regulaci-vykyvu-loni-dosahly-miliardy-eur-1266175>. *E15.cz* [online]. Praha: CN Invest, 2016 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://zpravy.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/nemecka-sit-nestiha-naklady-na-regulaci-vykyvu-loni-dosahly-miliardy-eur-1266175>
- [59] MORAVEC, Jan. Británie vydá 11 milionů liber na demonstrační projekty technologie Vehicle-to-Grid. *OEnergetice.cz* [online]. Česká republika: oEnergetice.cz, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/cista-mobilita/britska-vlada-vyda-11-milionu-liber-na-demonstracni-projekty-technologie-v2g/>
- [60] SŮRA, Jan. Norská elektrojízda pokračuje: Auta na baterie poprvé tvořily více jak polovinu prodejů. *ZDopravy* [online]. Česká republika: Impresum, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://zdopravy.cz/norska-elektrojizda-pokracuje-auta-na-baterie-poprve-tvorily-vice-jak-polovinu-prodeju-6252/>
- [61] HOŘČÍK, Jan. Jak to vypadá na rušné norské nabíječe Tesla Supercharger?: Podívejte se na videa!. *Hybrid.cz* [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/jak-vypada-na-rusne-norske-nabijecce-tesla-supercharger-podivejte-se-na-vida>
- [62] VOBOŘIL, David. Počet nabíjecích míst pro elektromobily v Německu se za poslední rok téměř zdvojnásobil. *Oenergetice.cz* [online]. Česká republika: Oenergetice.cz, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektromobilita/pocet-nabijecich-mist-elektromobily-nemecku-se-za-posledni-rok-temer-zdvojnasil/>
- [63] BUDÍN, Jan. Infografika: Elektromobilita v Evropské unii a srovnání s Českou republikou. *Oenergetice.cz* [online]. Česká republika: Oenergetice.cz, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/cista-mobilita/infografika-elektromobilita-evropske-unii-srovnani-ceskou-republikou/>
- [64] HOŘČÍK, Jan. Už to začíná - Oslo kvůli znečištění ovzduší zakázalo až do odvolání vjezd dieselvým autům. [Http://www.hybrid.cz/](http://www.hybrid.cz/) [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/uz-zacina-oslo-kvuli-znecisteni-ovzdusi-zakazalo-az-do-odvolani-vjezd-dieselovym-autum>
- [65] ČTK, . Čína bojuje se smogem: Polovina aut v Pekingu má zakázáno vyjet. *Lidovky.cz* [online]. Praha: MAFRA, 2016 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z:

[https://www.lidovky.cz/cina-bojuje-se-smogem-polovina-aut-v-pekingu-ma-zakazano-vyjet-p68-/zpravy-svet.aspx?c=A161217\\_114832\\_ln\\_zahranici\\_ele](https://www.lidovky.cz/cina-bojuje-se-smogem-polovina-aut-v-pekingu-ma-zakazano-vyjet-p68-/zpravy-svet.aspx?c=A161217_114832_ln_zahranici_ele)

- [66] MAJLING, Eduard. EU schválila ČR dotační program na rozvoj infrastruktury pro nízkoemisní vozidla. *Oenergetice.cz* [online]. Česká republika: Oenergetice.cz, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/evropska-unie/eu-schvalila-cr-dotacni-program-rozvoj-infrastruktury-nizkoemisni-vozidla/>
- [67] HOŘČÍK, Jan. Německo proti Tesle: na její elektromobily už zase nelze získat dotaci. *Hybrid.cz* [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/nemecko-proti-tesle-na-její-elektromobily-uz-zase-nelze-ziskat-dotaci>
- [68] HOŘČÍK, Jan. Německo: 600 mil. eur na podporu elektromobily je téměř netknutých. *Hybrid.cz* [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/nemecko-600-mil-eur-na-podporu-elektromobily-je-temer-netknutych>
- [69] VOTRUBA, Jan. WoodMac: Světová poptávka po benzínu vyvrcholí v roce 2030 díky elektromobilům. *Oenergetice.cz* [online]. Česká republika: Oenergetice.cz, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/ropa/woodmac-svetova-poptavka-benzinu-vyvrcholi-roce-2030-diky-elektromobilum/>
- [70] ČERVINKOVÁ, Jana. Indie chce mít všechna auta do roku 2030 poháněná elektřinou. *Oenergetice.cz* [online]. Česká republika: Oenergetice.cz, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektromobilita/indie-chce-mit-vsechna-auta-2030-pohanena-elektrinou/>
- [71] BUDÍN, Jan. OPEC zpět násobil svůj výhled počtu elektromobilů v roce 2040. *Oenergetice.cz* [online]. Česká republika: Oenergetice.cz, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektromobilita/opec-zpetinasobil-svuj-vyhled-poctu-elektromobilu-roce-2040/>
- [72] HYBRID.CZ, . Poptávka po uhlí ve světě poroste, hlavně v Asii. *Hybrid.cz* [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/poptavka-po-uhli-ve-svete-poroste-hlavne-v-asii>
- [73] ČEZ, . Vy se ptáte, Elektromobilita ČEZ odpovídá. *Emobilita: Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.elektromobilita.cz/cs/o-nas/novinky/5118.html>
- [74] HOŘČÍK, Jan. Nabíjení elektromobilů je velký byznys, ChargePoint v USA prodá každý měsíc 8 GWh. *Hybrid.cz* [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne,

- 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/nabijeni-elektromobilu-je-velky-byznys-chargepoint-v-usa-proda-kazdy-mesic-8-gwh>
- [75] ČEZ, . Jak se stát zákazníkem. *Emobilita* [online]. Praha: ČEZ, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.elektromobilita.cz/cs/jak-se-stat-zakaznikem.html>
- [76] ŠINDELÁŘ, Jan. ČEZ skokově navýší počet dobíjecích stanic, získal evropské dotace. *Zdopravy.cz* [online]. Česká republika: Impresum, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://zdopravy.cz/cez-skokove-navysi-pocet-dobijecich-stanic-ziskal-evropske-dotace-4778/>
- [77] ČTK, . V Česku je už přes 300 nabíjecích míst pro elektromobily, jejich počet dále poroste. *YouRadio News* [online]. Praha: Lagardere Active ČR, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://news.youradio.cz/tema/v-cesku-je-uz-pres-300-nabijecich-mist-pro-elektromobily-jejich-pocet-dale-poroste-12779>
- [78] VEJROSTA, Jiří. BP vyjednává s výrobcí elektromobilů o rozšíření svých čerpacích stanic o dobíjecí stanice. *Oenergetice.cz* [online]. Česká republika: Oenergetice.cz, 2017 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektromobilita/bp-vyjednava-vyrobci-elektromobilu-rozsireni-svych-cerpacich-stanic-dobijeci-stanice/>
- [79] DOSTÁL, Petr. *Pokročilé metody rozhodování v podnikatelství a veřejné správě*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2012, 713 s. : il., grafy, tab. ISBN 978-80-7204-798-7.
- [80] HILLIER, Frederick a Gerald LIEBERMAN. *Introduction to operations research*. Tenth edition. New York, NY: McGraw-Hill, 2015. ISBN 978-0073523453.
- [81] ZELINKA, Ivan. *Umělá inteligence v problémech globální optimalizace*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 189 s. : grafy, tab. ISBN 80-7300-069-5.
- [82] ZELINKA, Ivan. *Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace*. 1. české vyd. Praha: BEN, 2009, 534 s. ISBN 978-80-7300-218-3.
- [83] VESTERSTROM, J., J. RIGET a T. KRINK. Division of labor in particle swarm optimisation. In: *Evolutionary Computation, 2002. CEC '02. Proceedings of the 2002 Congress on*. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2002, 2, s. 1570-1575. DOI: 10.1109/CEC.2002.1004476. ISBN 0-7803-7282-4. ISSN 1530-9304.
- [84] DRÉO, J. *Metaheuristics for hard optimization: methods and case studies*. 1. Berlin: Springer, 2006. ISBN 978-3540230229.

- [85] DOSTÁL, Petr. *Soft computing v podnikatelství a veřejné správě*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015, 2 sv. : il., mapy, grafy. ISBN 978-80-7204-896-0.
- [86] GOLDBERG, David. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. 1. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., 1989. ISBN 0201157675.
- [87] MICHALEWICZ, Zbigniew. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Third, Revised and Extended Edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996. ISBN 9783662033159.
- [88] HOLLAND, John. *Adaptation in natural and artificial systems an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. 1st MIT Press ed. Cambridge, Mass: MIT Press, 1992. ISBN 9780262275552.
- [89] DAWKINS, Richard. *The blind watchmaker: why the evidence of evolution reveals a universe without design*. 2nd ed. New York: Norton, 1996. ISBN 9780393315707.
- [90] DAWKINS, Richard. *The selfish gene*. 1st ed. Oxford: Oxford University Press, 1976. ISBN 978-0-19-857519-1.
- [91] PAN, K., M. BALDWIN, J. NGUYEN et al. Conversion of alpha-helices into beta-sheets features in the formation of the scrapie prion proteins. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 1993, 90(23), 10962-10966 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1073/pnas.90.23.10962. ISSN 0027-8424. Dostupné z: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.90.23.10962>
- [92] GARCÍA-VILLALOBOS, J., I. ZAMORA, J.I. SAN MARTÍN, F.J. ASENSIO a V. APERRIBAY. Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, 38(1), 717-731 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.040. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114004924>
- [93] HAIDAR, Ahmed, Kashem MUTTAQI a Danny SUTANTO. Technical challenges for electric power industries due to grid-integrated electric vehicles in low voltage distributions: A review. *Energy Conversion and Management* [online]. 2014, 86(1), 689-700 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.06.025. ISSN 01968904. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890414005500>
- [94] SCHMIDT, Johannes, Matthias EISEL a Lutz KOLBE. Assessing the potential of different charging strategies for electric vehicle fleets in closed transport



- systems. *Energy Policy* [online]. 2014, 74(1), 179-189 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.08.008. ISSN 03014215. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421514004613>
- [95] YANG, Jun, Lifu HE a Siyao FU. An improved PSO-based charging strategy of electric vehicles in electrical distribution grid. *Applied Energy* [online]. 2014, 128(1), 82-92 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.04.047. ISSN 03062619. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914004000>
- [96] ZHANG, Kangkang, Liangfei XU, Minggao OUYANG, Hewu WANG, Languang LU, Jianqiu LI a Zhe LI. Optimal decentralized valley-filling charging strategy for electric vehicles. *Energy Conversion and Management* [online]. 2014, 78(1), 537-550 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.11.011. ISSN 01968904. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890413007322>
- [97] BATTISTELLI, C. a A.J. CONEJO. Optimal management of the automatic generation control service in smart user grids including electric vehicles and distributed resources. *Electric Power Systems Research* [online]. 2014, 111(1), 22-31 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.01.008. ISSN 03787796. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779614000121>
- [98] BHATTI, Abdul, Zainal SALAM, Mohd AZIZ, Kong YEE a Ratil ASHIQUE. Electric vehicles charging using photovoltaic: Status and technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, 54(1), 34-47 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.091. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115010618>
- [99] LÓPEZ, M.A., S. MARTÍN, J.A. AGUADO a S. DE LA TORRE. V2G strategies for congestion management in microgrids with high penetration of electric vehicles. *Electric Power Systems Research* [online]. 2013, 104(1), 28-34 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.epsr.2013.06.005. ISSN 03787796. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779613001557>
- [100] GEORGILAKIS, Pavlos a Nikos HATZIARGYRIOU. A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research. *Electric Power Systems Research* [online]. 2015, 121(1), 89-100 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.12.010. ISSN 03787796. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779614004490>
- [101] RAHMAN, Imran, Pandian VASANT, Balbir SINGH, M. ABDULLAH-AL-WADUD a Nadia ADNAN. Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, 58(1), 1039-1047 [cit. 2018-05-25].

DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.353. ISSN 13640321. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403211600006X>

- [102] RICHARDSON, David. Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, 19(1), 247-254 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.042. ISSN 13640321. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112006557>
- [103] YONG, Jia, Vigna RAMACHANDARAMURTHY, Kang TAN a N. MITHULANANTHAN. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, 49(1), 365-385 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.130. ISSN 13640321. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115004001>
- [104] PEKÁREK, Jan. *Evoluční algoritmy v problému nabíjecí infrastruktury pro elektromobily*. Brno, 2014. Příspěvek na Workshop specifického výzkumu 2014. Vysoká učení technické v Brně.
- [105] PEKÁREK, Jan. A Dynamical Model of the Charging Station Placement Problem. In: *Innovation Vision 2020: From Regional Development Sustainability to Global Economic Growth*. 25. Amsterdam, Netherlands: International Business Information Management Association (IBIMA), 2015, s. 2292-2302. ISBN 978-0-9860419-4-5.
- [106] PEKÁREK, Jan. *Pojednání ke Státní doktorské zkoušce: Optimalizace rozmístění nabíjecí infrastruktury pro elektromobily*. Brno, 2016. Pojednání. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Petr Dostál, CSc.
- [107] WANG, Ying-Wei a Chuah-Chih LIN. Locating road-vehicle refueling stations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* [online]. 2009, 45(5), 821-829 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.tre.2009.03.002. ISSN 13665545. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1366554509000313>
- [108] WANG, Ying-Wei a Chuan-Ren WANG. Locating passenger vehicle refueling stations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* [online]. 2010, 46(5), 791-801 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.tre.2009.12.001. ISSN 13665545. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1366554509001513>
- [109] CHEN, T., Kara KOCKELMAN a Moby KHAN. Locating Electric Vehicle Charging Stations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 2018, 2385(1), 28-36 [cit. 2018-05-25].

DOI: 10.3141/2385-04. ISSN 0361-1981. Dostupné z:  
<http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2385-04>

- [110] YOU, Peng-Sheng a Yi-Chih HSIEH. A hybrid heuristic approach to the problem of the location of vehicle charging stations. *Computers & Industrial Engineering* [online]. 2014, 70(1), 195-204 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.cie.2014.02.001. ISSN 03608352. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835214000345>
- [111] HESS, Andrea, Francesco MALANDRINO, Moritz REINHARDT, Claudio CASETTI, Karin HUMMEL a Jose BARCELÓ-ORDINAS. Optimal deployment of charging stations for electric vehicular networks. In: *Proceedings of the first workshop on Urban networking - UrbaNe '12*. New York, New York, USA: ACM Press, 2012, s. 1-6. DOI: 10.1145/2413236.2413238. ISBN 9781450317818. Dostupné také z:  
<http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2413236.2413238>
- [112] LAM, Albert, YIU-WING LEUNG a XIAOWEN CHU. Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solutions. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2014, 5(6), 2846-2856. DOI: 10.1109/TSG.2014.2344684. ISSN 1949-3053. Dostupné také z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6879337/>
- [113] SADEGHI-BARZANI, Payam, Abbas RAJABI-GHAHNAVIEH a Hosein KAZEMI-KAREGAR. Optimal fast charging station placing and sizing. *Applied Energy* [online]. 2014, 125(1), 289-299 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.03.077. ISSN 03062619. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914003171>
- [114] WORLEY, Owen, Diego KLABJAN a Timothy SWEDA. Simultaneous vehicle routing and charging station siting for commercial Electric Vehicles. In: *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*. Greenville, USA: IEEE, 2012, s. 1-3. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183279. ISBN 978-1-4673-1561-6. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6183279/>
- [115] DANTZIG, G. a J. RAMSER. The Truck Dispatching Problem. *Management Science* [online]. 1959, 6(1), 80-91 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1287/mnsc.6.1.80. ISSN 0025-1909. Dostupné z:  
<http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.6.1.80>
- [116] XI, Xiaomin, Ramteen SIOSHANSI a Vincenzo MARANO. Simulation–optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2013, 22(1), 60-69 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1016/j.trd.2013.02.014.

ISSN 13619209. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920913000345>

- [117] HE, Fang, Di WU, Yafeng YIN a Yongpei GUAN. Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological* [online]. 2013, 47(1), 87-101 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.trb.2012.09.007. ISSN 01912615. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191261512001336>
- [118] NING, Guobao, Zijian ZHEN, Peng WANG, Yang LI a Huaixian YIN. Economic Analysis on Value Chain of Taxi Fleet with Battery-Swapping Mode Using Multiobjective Genetic Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering* [online]. 2012, 2012(1), 1-15 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1155/2012/175912. ISSN 1024-123X. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2012/175912/>
- [119] WANG, Guibin, Zhao XU, Fushuan WEN a Kit WONG. Traffic-Constrained Multiobjective Planning of Electric-Vehicle Charging Stations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2013, 28(4), 2363-2372. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2269142. ISSN 0885-8977. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6555966/>
- [120] JAMIAN, J.J., M.W. MUSTAFA, H. MOKHLIS a M.A. BAHARUDIN. Simulation study on optimal placement and sizing of Battery Switching Station units using Artificial Bee Colony algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* [online]. 2014, 55(1), 592-601 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.10.009. ISSN 01420615. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061513004262>
- [121] NIE, Yu a Mehrnaz GHAMAMI. A corridor-centric approach to planning electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part B: Methodological* [online]. 2013, 57(1), 172-190 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.trb.2013.08.010. ISSN 01912615. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019126151300146X>
- [122] HENGSONG WANG, , QI HUANG, CHANGHUA ZHANG a AIHUA XIA. A novel approach for the layout of electric vehicle charging station. In: *The 2010 International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis Proceeding*. IEEE, 2010, s. 64-70. DOI: 10.1109/ICACIA.2010.5709852. ISBN 978-1-4244-8025-8. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5709852/>
- [123] DAVIDOV, Sreten a Miloš PANTOŠ. Planning of electric vehicle infrastructure based on charging reliability and quality of service. *Energy* [online]. 2017, 118(1), 1156-1167 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.energy.2016.10.142. ISSN

03605442.

Dostupné

z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544216315882>

- [124] LAM, Albert a Victor LI. Chemical-Reaction-Inspired Metaheuristic for Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2010, 14(3), 381-399. DOI: 10.1109/TEVC.2009.2033580. ISSN 1941-0026. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5353674/>
- [125] XU, Hao, Shihong MIAO, Chunyong ZHANG a Dongyuan SHI. Optimal placement of charging infrastructures for large-scale integration of pure electric vehicles into grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* [online]. 2013, 53(1), 159-165 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.04.022. ISSN 01420615. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061513001907>
- [126] MICARI, Salvatore, Antonio POLIMENI, Giuseppe NAPOLI, Laura ANDALORO a Vincenzo ANTONUCCI. Electric vehicle charging infrastructure planning in a road network. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, 80(1), 98-108 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.022. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117306603>
- [127] MARTÍNEZ-LAO, Juan, Francisco MONTOYA, Maria MONTOYA a Francisco MANZANO-AGUGLIARO. Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, 77(1), 970-983 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.239. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116310152>
- [128] LEVINSON, Rebecca a Todd WEST. Impact of public electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2017, (), - [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.trd.2017.10.006. ISSN 13619209. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136192091630757X>
- [129] YI, Zonggen a Peter BAUER. Optimization models for placement of an energy-aware electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* [online]. 2016, 91(1), 227-244 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.tre.2016.04.013. ISSN 13665545. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1366554515302520>
- [130] SHUKLA, Akanksha, Kusum VERMA a Rajesh KUMAR. Consumer perspective based placement of electric vehicle charging stations by clustering techniques. In: *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*. Bhubaneswar,

- India: IEEE, 2016, s. 1-6. DOI: 10.1109/NPSC.2016.7858946. ISBN 978-1-4673-9968-5. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7858946/>
- [131] XIONG, Yanhai, Jiarui GAN, Bo AN, Chunyan MIAO a Ana BAZZAN. Optimal Electric Vehicle Fast Charging Station Placement Based on Game Theoretical Framework. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017, (-), 1-12. DOI: 10.1109/TITS.2017.2754382. ISSN 1524-9050. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8064175/>
- [132] PEKÁREK, Jan. Determination of electric vehicle charging demand. In: *Innovation Management and Sustainable Economic Competitive Advantage: From Regional Development to Global Growth*. 26. Madrid, Spain: International Business Information Management Association (IBIMA), 2015, s. 1211-1220. ISBN 978-0-9860419-5-2.
- [133] HIDALGO, Pablo, Annette TRIPPE, Markus LIENKAMP a Thomas HAMACHER. Mobility Model for the Estimation of the Spatiotemporal Energy Demand of Battery Electric Vehicles in Singapore. In: *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Las Palmas, Spain: IEEE, 2015, s. 578-583. DOI: 10.1109/ITSC.2015.101. ISBN 978-1-4673-6596-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7313193/>
- [134] SINGAPORE DEPARTMENT OF STATISTICS, . *General Household Survey 2015*. 1st ed. Singapore: Singapore Department of Statistics, 2016. ISBN 978-981-09-8924-8.
- [135] HIDALGO, Pablo, Max OSTENDORP a Markus LIENKAMP. Optimizing the charging station placement by considering the user's charging behavior. In: *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. Leuven, Belgium: IEEE, 2016, s. 1-7. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2016.7513920. ISBN 978-1-4673-8463-6. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7513920>
- [136] HARRIS, Chioke a Michael WEBBER. An empirically-validated methodology to simulate electricity demand for electric vehicle charging. *Applied Energy* [online]. 2014, 126(1), 172-181 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.03.078. ISSN 03062619. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914003183>
- [137] SEARS, Justine, Karen GLITMAN a David ROBERTS. Forecasting demand of public electric vehicle charging infrastructure. In: *2014 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*. Portland, OR, USA: IEEE, 2014, s. 250-254. DOI: 10.1109/SusTech.2014.7046252. ISBN 978-1-4799-5238-0. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7046252/>

- [138] USA. *Evaluating Electric Vehicle Charging Impacts and Customer Charging Behaviors: Experience from Six Smart Grid Investments Grant Projects*. In: . Washington, USA: U.S. Department of Energy, 2014, ročník 1, číslo 1. Dostupné také z: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/12/f19/SGIG-EvaluatingEVcharging-Dec2014.pdf>
- [139] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, . National Household Travel Survey. *2017 National Household Travel Survey* [online]. Washington, USA: U.S. Department of Transportation, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.nationalhouseholdtravelsurvey.com/>
- [140] *Celostátní sčítání dopravy 2016* [online]. Praha: Ředitelství silnic a dálnic ČR, 2017 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://scitani2016.rsd.cz/pages/informations/default.aspx>
- [141] BAILEY, Joseph, Amy MIELE a Jonn AXSEN. Is awareness of public charging associated with consumer interest in plug-in electric vehicles?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2015, 36(1), 1-9 [cit. 2018-05-30]. DOI: 10.1016/j.trd.2015.02.001. ISSN 13619209. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920915000103>
- [142] AZADFAR, Elham, Victor SREERAM a David HARRIES. The investigation of the major factors influencing plug-in electric vehicle driving patterns and charging behaviour. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 42, 1065-1076. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.058>. ISSN 13640321. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008831>
- [143] SPEIDEL, Stuart a Thomas BRÄUNL. Driving and charging patterns of electric vehicles for energy usage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, 40(1), 97-110 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.177. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114006297>
- [144] ROBINSON, A.P., P.T. BLYTHE, M.C. BELL, Y. HÜBNER a G.A. HILL. Analysis of electric vehicle driver recharging demand profiles and subsequent impacts on the carbon content of electric vehicle trips. *Energy Policy* [online]. 2013, 61(1), 337-348 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.05.074. ISSN 03014215. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513004266>
- [145] KUBY, Michael a Seow LIM. The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles. *Socio-Economic Planning Sciences* [online]. 2005, 39(2), 125-145 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.seps.2004.03.001. ISSN

00380121.

Dostupné

z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038012104000175>

- [146] KRAFT, Stanislav a Tomáš KVĚTOŇ. *Daily Spatial Mobility and Transport Behaviour in the Czech Republic*. 1st ed. Mauritius: Lambert Academic Publishing, 2015. ISBN 978-3659357749.
- [147] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, . Developing Infrastructure to Charge Plug-In Electric Vehicles. *Alternative Fuel Data Center* [online]. Washington, USA: U.S. Department of Energy, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: [https://www.afdc.energy.gov/fuels/electricity\\_infrastructure.html](https://www.afdc.energy.gov/fuels/electricity_infrastructure.html)
- [148] VOLLERS, Welmoed, Roland STEINMETZ a Qi HAN. Sustainable business models for public charging points. In: *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*. Barcelona, Spain: IEEE, 2013, s. 1-11. DOI: 10.1109/EVS.2013.6915022. ISBN 978-1-4799-3832-2. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6915022>
- [149] NIGRO, Nick a Matt FRADES. Business Models for Financially Sustainable EV Charging Networks. *Washington State Legislature* [online]. USA: State of Washington, 2015 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: [http://leg.wa.gov/JTC/Documents/Studies/EV/FinalReport\\_EVChargingNetworksWEB.pdf](http://leg.wa.gov/JTC/Documents/Studies/EV/FinalReport_EVChargingNetworksWEB.pdf)
- [150] ZHANG, Weixiong. *Branch-and-Bounds Search Algorithms and Their Computational Complexity* [online]. California, USA, 1996 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a314598.pdf>. Research Article. University of Southern California.
- [151] GONZÁLEZ, Jairo, Roberto ALVARO, Carlos GAMALLO, Manuel FUENTES, Jesús FRAILE-ARDANUY, Luk KNAPEN a Davy JANSSENS. Determining Electric Vehicle Charging Point Locations Considering Drivers' Daily Activities. *Procedia Computer Science* [online]. 2014, 32(1), 647-654 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.472. ISSN 18770509. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050914006723>
- [152] LAWPHONGPANICH, Siriphong a Yafeng YIN. Solving the Pareto-improving toll problem via manifold suboptimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* [online]. 2010, 18(2), 234-246 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.trc.2009.08.006. ISSN 0968090X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X09001107>
- [153] LIN, Xiangning, Jinwen SUN, Shengfang AI, Xiaoping XIONG, Yunfei WAN a Dexian YANG. Distribution network planning integrating charging stations of electric vehicle with V2G. *International Journal of Electrical Power & Energy*



*Systems* [online]. 2014, 63(1), 507-512 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.06.043. ISSN 01420615. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061514004013>

- [154] SAATY, Thomas. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. 1st ed. London: McGraw-Hill International Book Co., 1980. ISBN 9780070543713.
- [155] SAATY, Thomas. Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas* [online]. 2008, 102(2), 251–318 [cit. 2018-05-26]. ISSN 1579-1505. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2FBF03191825>
- [156] JAKL, Ladislav. *Metodologie vědy a výzkumu se zaměřením na oblast práv k průmyslovému a jinému duševnímu vlastnictví*. První vydání. Praha: Metropolitan University Prague Press, 2015, 136 stran. ISBN 978-80-87956-24-3.
- [157] LOUŽEK, Marek. *Metodologie ekonomie*. Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2009, 604 s. ISBN 978-80-246-1309-3.
- [158] YIN, Robert. *Case study research: design and methods*. 4th ed. Los Angeles: Sage, 2009, xiv, 219 s. : grafy, tab. ISBN 978-1-4129-6099-1.
- [159] HENDL, Jan. *Kvalitativní výzkum: základní teorie, metody a aplikace*. Čtvrté, přepracované a rozšířené vydání. Praha: Portál, 2016, 437 stran : ilustrace. ISBN 978-80-262-0982-9.
- [160] MAXWELL, Joseph. *Qualitative research design: an interactive approach*. 2nd ed. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 2005, xiv, 174 s. : grafy, tab. ISBN 0761926070.
- [161] MOLNÁR, Zdeněk. *Pokročilé metody vědecké práce*. 1. vyd. Zeleneč: Profess Consulting, 2012. Věda pro praxi (Profess Consulting). ISBN 9788072590643.
- [162] COOPER, Donald a C.William EMORY. *Business research methods*. 5th ed. Chicago: Irwin, 1995, 681 s. ISBN 0-256-13777-3.
- [163] POPPER, Karl. *Logika vědeckého bádání*. 1. vyd. Praha: OIKOYMENH, 1997. Oikúmené. ISBN 80-86005-45-3.
- [164] HAYEK, Friedrich. *Právo, zákonodárství a svoboda. (Nový výklad liberálních principů spravedlnosti a politické ekonomie/.1)Pravidla a řád*. 1.vyd. Praha: Academia, 1991, 131 s. ISBN 80-200-0279-0.

- [165] HAYEK, Friedrich a Ján PAVLÍK, Danica SLOUKOVÁ. *Kontrarevoluce vědy: studie o zneužívání rozumu*. 1. vyd. Praha: Liberální institut, 1995. ISBN 9788085787870.
- [166] ŘEZNÍČEK, Václav. Hayekova kritická reflexe hranic rozumu. *Electronic Journal for Philosophy* [online]. Praha, 2011, 1(1), 1-21 [cit. 2018-05-26]. ISSN 1211-0442. Dostupné z: <https://nb.vse.cz/kfil/elogos/student/reznicek11.pdf>
- [167] DALKIR, Kimiz. *Knowledge management in theory and practice*. 1st ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005, xv, 356 s. : il. ISBN 978-0-7506-7864-3.
- [168] HOLMAN, Robert a Dana POSPÍCHALOVÁ. *Úvod do ekonomie pro střední školy*. Vyd. 1. Praha: C. H. Beck, 2001, xii, 189 s. ISBN 80-7179-023-0.
- [169] HOŘEJŠÍ, Bronislava. *Mikroekonomie*. 5., aktualiz. vyd. Praha: Management Press, 2010, 574 s. : grafy, tab. ISBN 978-80-7261-218-5.
- [170] JABLONSKÝ, Josef. *Operační výzkum: kvantitativní modely pro ekonomické rozhodování*. 3. vyd. Praha: Professional Publishing, 2007, 323 s. : il. ISBN 978-80-86946-44-3.
- [171] FIALA, Petr. *Operační výzkum: nové trendy*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2010, 239 s. : grafy, tab. ISBN 978-80-7431-036-2.
- [172] OXFORD UNIVERSITY PRESS, . Service area. *Oxford Living Dictionaries* [online]. Oxford, UK: Oxford University Press, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: [https://en.oxforddictionaries.com/definition/service\\_area](https://en.oxforddictionaries.com/definition/service_area)
- [173] RAHIM, Saqib. Will Lithium-Air Battery Rescue Electric Car Drivers From 'Range Anxiety'?. *The New York Times* [online]. New York: The New York Times, 2010 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://archive.nytimes.com/www.nytimes.com/cwire/2010/05/07/07climatewire-will-lithium-air-battery-rescue-electric-car-37498.html>
- [174] NÁRODNÍ DOPRAVNÍ INFORMAČNÍ CENTRUM, . Zjednodušená vektorová data dopravních úseků silniční sítě České republiky. *Národní dopravní informační centrum: Ředitelství silnic a dálnic* [online]. Ostrava: Ředitelství silnic a dálnic, 2014 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://portal.dopravniinfo.cz/informacni-a-ridici-centra-dopravy/narodni-dopravni-informacni-centrum#>
- [175] Zákon č. 13/1997 Sb.: Zákon o pozemních komunikacích. In: *Sbírka zákonů ČR*. Praha: Česká republika, 1997, ročník 1, číslo 1. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-13>

- [176] *Celostátní sčítání dopravy 2010* [online]. Praha: Ředitelství silnic a dálnic, 2011 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://scitani2010.rsd.cz/pages/informations/default.aspx>
- [177] *Open Charge Map Database* [online]. <https://www.openchargemap.com/site>: Open Charge Map, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.openchargemap.com/site>
- [178] *Centrální registr vozidel* [online]. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://www.mdcz.cz/Statistiky/Silnicni-doprava/Centralni-registr-vozidel/>
- [179] KRAJÍČEK, Antonín. *Počítačový návrh umístění primárního přehledového radaru na letišti* [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=73205](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=73205). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Láčik, Ph.D.
- [180] ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘIČSKÝ A KATASTRÁLNÍ, . *Návod pro správu geodetických základů České republiky* [online]. 1. vyd. Praha: Zeměměřický úřad, 2015 [cit. 2018-05-30]. ISBN 978-80-86918-86-0. Dostupné z: [https://www.cuzk.cz/Predpisy/Resortni-predpisy-a-opatreni/Navody-CUZK/Navod\\_pro\\_spravu\\_geodetickych\\_zakladu\\_151086722-\(1.aspx](https://www.cuzk.cz/Predpisy/Resortni-predpisy-a-opatreni/Navody-CUZK/Navod_pro_spravu_geodetickych_zakladu_151086722-(1.aspx)
- [181] *World Geodetic System - 1984 (WGS-84) Manual*. In: . Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2002, ročník 1, 2nd ed. Dostupné také z: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/ECARAIM/REF08-Doc9674.pdf>
- [182] SINNOTT, R.W. Virtues of the Haversine. *Sky and Telescope*. Cambridge, MA, USA, 1984, 68(2), 158. ISSN 0037-6604.
- [183] HYDRO QUEBÉC, . *Electric Vehicle Charging Stations: Technical Installation Guide*. *Hydro Québec* [online]. Québec, Canada: Hydro Québec, 2015 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://www.hydroquebec.com/data/electrification-transport/pdf/technical-guide.pdf>
- [184] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, . *Level 1 Electric Vehicle Charging Stations at the Workplace*. *Energy.gov* [online]. Washington, USA: U.S. Department of Energy, 2016 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/07/f33/WPCC\\_L1ChargingAtTheWorkplace\\_0716.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/07/f33/WPCC_L1ChargingAtTheWorkplace_0716.pdf)

- [185] BOSSCHE, Peter. IEC 62196. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_62196](https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_62196)
- [186] NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT, . Charging Infrastructure for Electric Vehicles in Germany. *Nationale Plattform Elektromobilität* [online]. Germany: Nationale Plattform Elektromobilität, 2015 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: [http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/AG3\\_Statusbericht\\_LIS\\_2015\\_engl\\_klein\\_bf.pdf](http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/AG3_Statusbericht_LIS_2015_engl_klein_bf.pdf)
- [187] GUINN, Suzanne. Level 1 vs Level 2 EV charging. *ClipperCreek* [online]. <https://www.clippercreek.com/>: ClipperCreek, 2017 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.clippercreek.com/level-1-level-2-charging-stations/>
- [188] *EV Solutions* [online]. <https://www.evsolutions.com/>: AeroVironment, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.evsolutions.com/>
- [189] FUNKE, Simon, Till GNANN a Patrick PLÖTZ. Addressing the Different Needs for Charging Infrastructure: An Analysis of Some Criteria for Charging Infrastructure Set-up. *E-Mobility in Europe* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015, (-), 73-90 [cit. 2018-05-26]. Green Energy and Technology. DOI: 10.1007/978-3-319-13194-8\_4. ISBN 978-3-319-13193-1. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-13194-8\\_4](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-13194-8_4)
- [190] PEKÁREK, Jan. A Model of Charging Service Demand for the Czech Republic. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* [online]. 2017, 65(5), 1741-1750 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.11118/actaun201765051741. ISSN 1211-8516. Dostupné z: <https://acta.mendelu.cz/65/5/1741/>
- [191] MATHWORKS, . MATLAB Documentation. *Mathworks* [online]. Natick, USA: Mathworks, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/mesh.html#f27-253146>
- [192] WU, Bang a Kun-Mao. CHAO. *Spanning trees and optimization problems*. 1. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC, 2004. ISBN 1584884363.
- [193] CORMEN, Thomas. *Introduction to algorithms*. 3rd ed. Cambridge: MIT Press, 2009, xix, 1292 s. ISBN 978-0-262-03384-8.
- [194] ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, . ESRI Shapefile Technical Description. *ESRI* [online]. <https://www.esri.com/>: ESRI, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>

- [195] BARTOŠ, Luděk. *Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích: Technické podmínky* [online]. 2. vyd. Praha: EDIP, 2012 [cit. 2018-05-26]. ISBN 978-80-87394-06-9. Dostupné z: [http://www.pjpk.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP189.pdf](http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP189.pdf)
- [196] WIKIPEDIA EN, . Electric car use by country. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_car\\_use\\_by\\_country](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country)
- [197] THE EV PROJECT, . How Do The EV Project Participants Feel about Charging Their EV at Home?. *Advanced Vehicles: Idaho National Laboratory* [online]. Freemont, USA: Idaho National Laboratory, 2015 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/EVProj/EVProjectParticipantsAndHomeCharging.pdf>
- [198] GRID FOR VEHICLES, . Evaluation of economic, environmental, regulatory and social aspects. *ECN* [online]. Netherlands: ECN, 2011 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2011/o11030.pdf>
- [199] XU, Min, Qiang MENG, Kai LIU a Toshiyuki YAMAMOTO. Joint charging mode and location choice model for battery electric vehicle users. *Transportation Research Part B: Methodological* [online]. 2017, 103(1), 68-86 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.trb.2017.03.004. ISSN 01912615. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019126151630368X>
- [200] SUN, Xiao-Hui, Toshiyuki YAMAMOTO a Takayuki MORIKAWA. Charge timing choice behavior of battery electric vehicle users. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2015, 37(1), 97-107 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.trd.2015.04.007. ISSN 13619209. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920915000395>
- [201] PEKÁREK, Jan a David SCHÜLLER. Charging Supply Measurement: The Case of Czech Republic. In: *SGEM International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts: Urban Planning, Architecture & Design: Conference Proceedings*. 2. Varna, Bulgaria: SGEM, 2017, s. 81-88. ISBN 978-619-7408-25-6. ISSN 2367-5659.
- [202] *Nabíjení elektromobilů* [online]. Česká republika: Asociace elektromobilového průmyslu, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://pluginmap.eu/>
- [203] *EV mapa* [online]. Česká republika: EVSELECT, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.evmapa.cz/>

- [204] *Mapa stanic na Hybrid.cz* [online]. Brandýs nad Labem: Chamanne, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/mapa-stanic/?t=ele>
- [205] SPOELSTRA, J. *Charging behaviour of Dutch EV drivers* [online]. Utrecht, 2014 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/10/Master%20Thesis%20Charging%20behaviour%20of%20Dutch%20EV%20drivers.pdf>. Master thesis. Utrecht University.
- [206] BROOKER, R. a Nan QIN. Identification of potential locations of electric vehicle supply equipment. *Journal of Power Sources* [online]. 2015, 299(1), 76-84 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.08.097. ISSN 03787753. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775315302512>
- [207] FRANKE, Thomas a Josef KREMS. Understanding charging behaviour of electric vehicle users. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* [online]. 2013, 21(1), 75-89 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.trf.2013.09.002. ISSN 13698478. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369847813000776>
- [208] PEARRE, Nathaniel, Willett KEMPTON, Randall GUENSLER a Vetri ELANGO. Electric vehicles: How much range is required for a day's driving?. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* [online]. 2011, 19(6), 1171-1184 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.trc.2010.12.010. ISSN 0968090X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X1100012X>
- [209] ANDRENACCI, N., R. RAGONA a G. VALENTI. A demand-side approach to the optimal deployment of electric vehicle charging stations in metropolitan areas. *Applied Energy* [online]. 2016, 182(1), 39-46 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.137. ISSN 03062619. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191631087X>
- [210] ROMINGER, Julian a Csaba FARKAS. Public charging infrastructure in Japan – A stochastic modelling analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* [online]. 2017, 90(1), 134-146 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.01.022. ISSN 01420615. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061516302332>
- [211] LILLY, Chris. Electric car market statistics. *Next Greencar* [online]. Bristol, UK: Next Greencar, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://www.nextgreencar.com/electric-cars/statistics/>
- [212] *Tesla* [online]. Palo Alto, CA, USA: Tesla Motors, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: [https://www.tesla.com/en\\_GB/supercharger?redirect=no](https://www.tesla.com/en_GB/supercharger?redirect=no)

- [213] *Fastned* [online]. Netherlands: Fastned, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://fastned.nl/>
- [214] *PlugShare* [online]. <https://www.plugshare.com/>: PlugShare, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.plugshare.com/>
- [215] *ChargePoint* [online]. London, UK: ChargePoint Network, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.chargepoint.com/en-gb/>
- [216] How GPU Acceleration Works. In: *Nvidia* [online]. USA: Nvidia, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.nvidia.com/en-us/about-nvidia/ai-computing/>
- [217] BUREAU OF LABOR STATISTICS, . CPI Inflation Calculator. *Bureau of Labor Statistics* [online]. Washington, USA: United States Department of Labor, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: [https://www.bls.gov/data/inflation\\_calculator.htm](https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm)
- [218] STATBUREAU, . Inflation Rate. *StatBureau* [online]. <https://www.statbureau.org/>: StatBureau, 2018 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.statbureau.org/>
- [219] SCHROEDER, Andreas a Thure TRABER. The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles. *Energy Policy* [online]. 2012, 43(1), 136-144 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.12.041. ISSN 03014215. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421511010470>
- [220] HE, Dawei, Weixuan LIN, Pascal NTSAMA a Ronald HARLEY. The return of investment analysis of a PHEV charging station with coordinated charging. In: *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* [online]. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012, s. 1439-1444 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1109/IECON.2012.6388561. ISBN 978-1-4673-2421-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6388561/>
- [221] KANE, Mark. Beijing Hit Electric Vehicle Registration Target For 2017 In Just Five Months. *InsideEVs* [online]. <https://insideevs.com/>: InsideEVs, 2017 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://insideevs.com/beijing-hit-electric-car-registration-target-for-2017-in-five-months/>
- [222] CHANG, Daniel, Daniel ERSTAD, Ellen LIN, Alicia RICE, Chia GOH a An-An TSAO. Financial Viability Of Non-Residential Electric Vehicle Charging Stations. *Luskin Center for Innovation* [online]. California, USA: University of California, 2012 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z:

<https://luskin.ucla.edu/sites/default/files/Non-Residential%20Charging%20Stations.pdf>

- [223] KETTLES, Doug. *Electric Vehicle Charging Technology Analysis And Standards* [online]. Florida, USA, 2015 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.ucf.edu/>. Academic report. University of Central Florida.
- [224] SIERZCHULA, William, Sjoerd BAKKER, Kees MAAT a Bert VAN WEE. The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption. *Energy Policy* [online]. 2014, 68(1), 183-194 [cit. 2018-05-26]. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.01.043. ISSN 03014215. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421514000822>
- [225] AGENBROAD, Josh a Ben HOLLAND. RMI: What's the true cost of EV charging stations?. *GreenBiz* [online]. <https://www.greenbiz.com/>: GreenBiz Group, 2014 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.greenbiz.com/blog/2014/05/07/rmi-whats-true-cost-ev-charging-stations>
- [226] IAKOV, Belskiy. *Analysis of development and economic effectiveness of E-mobility* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64878/F3-DP-2016-Belskiy-Iakov-Master%20thesis%20Belskiy%20Iakov%20KOS.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Tomáš Chmelík - ČEZ a.s.
- [227] SCHREIER, Martin. ČEZ Electromobility Expands Fast Charging Network. Construction Spurred by EU Grant. *ČEZ Group* [online]. Praha: ČEZ Group, 2016 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/en/cez-group/media/press-releases/5746.html>
- [228] SVATOŠ, Patrik. ČEZ zdražuje nabíjení. Dáte za něj třikrát tolik. *FDrive* [online]. 24net: 24net, 2016 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/cez-zdrazuje-nabijeni-date-za-nej-trikrat-tolik-464>
- [229] MORRIS, Charles. New report: Returns on EV infrastructure investment far outweigh costs. *Charged EVs: Electric vehicle magazine* [online]. Newcastle, UK: Isentropic Media, 2017 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://chargedevs.com/newswire/new-report-returns-on-ev-infrastructure-investment-far-outweigh-costs/>
- [230] CERES, . New Report Finds Increased Investment in Electric Vehicle Infrastructure Far Outweigh Costs. *Ceres* [online]. Boston, MA, USA: 1, 2017



- [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://www.ceres.org/news-center/press-releases/new-report-finds-increased-investment-electric-vehicle-infrastructure>
- [231] HOMEADVISOR, . How Much Do Electric Vehicle Charging Stations Cost To Install At Home?. *HomeAdvisor* [online]. Denver, CO, USA: HomeAdvisor International, 2018 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://www.homeadvisor.com/cost/garages/install-an-electric-vehicle-charging-station/>
- [232] BERMAN, Brad. The Ultimate Guide to Electric Car Charging Networks: 28.3.2018. *Plugincars.com* [online]. El Segundo, CA, USA: Recargo, 2018 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://www.plugincars.com/ultimate-guide-electric-car-charging-networks-126530.html>
- [233] PONCAROVÁ, Jana. Jak se jezdí řidičům elektromobilů v Česku. <https://www.penize.cz/> [online]. Praha: Partners media, 2018 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://www.penize.cz/spotrebitel/334708-jak-se-jezdi-ridicum-elektromobilu-v-cesku>
- [234] NEŠETŘIL, Jaroslav. a Patrice. OSSONA DE MENDEZ. *Sparsity: graphs, structures, and algorithms*. 1st ed. New York: Springer, 2012. Algorithms and combinatorics, 28. ISBN 978-3-642-27875-4.
- [235] ROBERTS, Mark. Sparse Matrix Compression Formats. *Computer Science* [online]. Colorado, USA: Colorado State University, 2018 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: [http://www.cs.colostate.edu/~mcrub/toolbox/c++/sparseMatrix/sparse\\_matrix\\_compression.html](http://www.cs.colostate.edu/~mcrub/toolbox/c++/sparseMatrix/sparse_matrix_compression.html)
- [236] NEUBAUER, Jeremy a Eric WOOD. The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility. *Journal of Power Sources* [online]. 2014, 257(1), 12-20 [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.075. ISSN 03787753. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775314000998>

## Odborný životopis

Jméno a příjmení: Ing. Jan Pekárek  
Trvalé bydliště: Bolzanova 31H, Znojmo, 669 02  
Narozen: 24. března 1989, Brno  
Kontakt pracovní: xpekar06@vutbr.cz  
Kontakt osobní: [pekarek.jan89@gmail.com](mailto:pekarek.jan89@gmail.com)

### Vzdělání

2014 – nyní VUT v Brně, Fakulta podnikatelská, doktorské studium – obor Řízení a ekonomika podniku, zaměření – ekonomické aplikace metod umělé inteligence  
2012 – 2014 VUT v Brně, Fakulta podnikatelská, magisterské studium – obor Informační management, titul Ing.  
2009 – 2012 VUT v Brně, Fakulta podnikatelská, bakalářské studium – obor Manažerská informatika, titul Bc.  
2004 – 2008 Gymnázium Dr. K. Polesného, Nám. Komenského 4, 669 75, Znojmo

### Některé relevantní pracovní zkušenosti

2018 – nyní datový analytik Mavenir s.r.o.  
2017 – 2018 datový analytik v OKAY s.r.o.  
2015 – 2018 lektor MS Office software v rámci předmětu Informatika pro ekonomy  
2015 – 2018 lektor předmětu Znalostní management v rámci MBA oboru soukromé školy SMA (Slovensko)  
2014 – 2018 lektor předmětů Pokročilé metody v rozhodování (analýza dat pomocí nástrojů AI)  
2014 – nyní doktorand při Ústavu informatiky, FP, VUT v Brně  
2008 – nyní jednorázové projekty: automatické webové analyzátory, návrh optimalizačního algoritmu pro webové aplikace, správa webových kampaní, datamining (MATLAB, Excel, částečně MS SQL)  
2008 – 2018 externí soukromý lektor: výuka matematiky, informatiky, ekonomie, angličtiny

### Jazykové znalosti

Anglický jazyk (C1)

### Ostatní zájmy

Technologické novinky obecně, ekonomie, informatika, odborná literatura, politika

## Seznam vydaných publikací

PEKÁREK, J.; SCHÜLLER, D. Optimization of the Automotive Service Centre Network for New Entrants into Czech and Slovak Markets. *Scientific Papers of the University of Pardubice, Series D*, 2018, no. 43, p. 196-207. ISSN: 1804-8048.

SCHÜLLER, D.; PEKÁREK, J. Customer Satisfaction Measurement – Clustering Approach. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2018, vol. 66, no. 2, p. 561-569. ISSN: 1211-8516.

SCHÜLLER, D.; PEKÁREK, J.; CHLEBOVSKÝ, V.; ŠIMBEROVÁ, I. Novel Method of Price Determination based on Reference Price. *Engineering Economics*, 2018, vol. 29, no. 1, p. 13-23. ISSN: 1392-2785.

PEKÁREK, J. A Model of Charging Service Demand for the Czech Republic. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2017, vol. 5, no. 65, p. 1741-1750. ISSN: 1211-8516.

MAZÁNEK, L.; PEKÁREK, J.; VRANIAK, L.; KONEČNÁ, Z. Identification Of Leadership Competencies In The International Environment. In *Global and national business theories and practice: bridging the past with the future*. Rome, Italy: EuroMed Press, 2017. p. 1018-1029. ISBN: 978-9963-711-56-7.

MAZÁNEK, L.; PEKÁREK, J.; VRANIAK, L.; KONEČNÁ, Z. Identification Of Leadership Competencies In The International Environment. *EuroMed Academy of Business Conference Book of Proceedings*, 2017, vol. 1, no. 1, p. 1018-1029. ISSN: 2547-8516.

PEKÁREK, J.; SCHÜLLER, D. Charging Supply Measurement: The Case of Czech Republic. In *Urban Planning, Architecture & Design: Conference Proceedings, Volume II. SGEM International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts*. 2017. p. 81-88. ISBN: 978-619-7408-25-6. ISSN: 2367-5659.

PEKÁREK, J.; SCHÜLLER, D. Buying Motives of Green Customer in Automotive Industry. In *Urban Planning, Architecture & Design: Conference Proceedings, Volume II. SGEM International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts*. 2017. p. 73-80. ISBN: 978-619-7408-25-6. ISSN: 2367-5659.

MAZÁNEK, L.; MEGOVÁ, S.; PEKÁREK, J. Current Personnel Marketing Approches As Applied By Local South Moravian HPO Company. In *Proceedings of the Interdisciplinary Scientific International Conference for PhD students and assistants*. 2017. p. 71-79. ISBN: 978-80-87952-20-7.

MAZÁNEK, L.; PEKÁREK, J.; VESELÝ, J. South Moravian SME's Performance in Relation to Maturity of Leadership: Results of a Quantitative Research Study. In *Innovation, Management, Entrepreneurship and Sustainability. Proceedings of the 5th International Conference (IMES 2017)*. Oeconomica, 2017. p. 596-605. ISBN: 978-80-245-2216-6.

SCHÜLLER, D.; PEKÁREK, J. Market Attractiveness Classification of European Union Countries for Establishing Logistics Centres. *Vědecký sborník*, 2016, vol. 24, no. 05/2016, p. 3-13. ISSN: 0572-3043.

PEKÁREK, J.; SCHÜLLER, D. Importance of Customer Satisfaction Factors in Strategic Marketing: Neural Network Method. In *Innovation Management and Sustainable Economic Competitive Advantage: From Regional Development to Global Growth*. 26. Madrid, Spain: International Business Information Management Association (IBIMA), 2015. p. 1174-1182. ISBN: 978-0-9860419-5-2.

PEKÁREK, J. Determination of Electric Vehicle Charging Demand. In *Innovation Management and Sustainable Economic Competitive Advantage: From Regional Development to Global Growth*. 26. Madrid, Spain: International Business Information Management Association (IBIMA), 2015. p. 1211-1220. ISBN: 978-0-9860419-5-2.

SCHÜLLER, D.; PEKÁREK, J.; RAŠTICOVÁ, M. Managerial Decisions on Optimal Number of Demand Segments. In *2nd International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts SGEM2015*. 2. Albena, Bulgaria: Bulgarian Academy of Sciences, 2015. p. 545-552. ISBN: 978-619-7105-48-3.

SCHÜLLER, D.; PEKÁREK, J.; DOSTÁL, P.; CHLEBOVSKÝ, V. Profitability of Customer Satisfaction Segments: Genetic Algorithm Method in Multidimensional Clustering. In *Innovation Vision 2020: From Regional Development Sustainability to Global Economic Growth*. 25. Amsterdam, Netherlands: 2015. p. 2561-2571. ISBN: 978-0-9860419-4-5.

PEKÁREK, J. A Dynamical Model of the Charging Station Placement Problem. In *Innovation Vision 2020: From Regional Development Sustainability to Global Economic Growth*. 25. Amsterdam, Netherlands: International Business Information Management Association (IBIMA), 2015. p. 2292-2302. ISBN: 978-0-9860419-4-5.

PEKÁREK, J. *Evoluční algoritmy v problému nabíjecí infrastruktury pro elektromobily*. 2014. s. 1-13.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Vývoj světového počtu elektromobilů.....	20
Obr. 2: Globální počty prodejů čistých elektromobilů a hybridů .....	21
Obr. 3: Rozdělení optimalizační metod podle [83].....	27
Obr. 4: Rozdělení optimalizačních metod podle [81].....	27
Obr. 5: Rozdělení optimalizačních metod podle [84].....	28
Obr. 6: Rozdělení optimalizačních metod podle [85].....	29
Obr. 7: Schéma operace křížení v GA .....	30
Obr. 8: Zjednodušený diagram silniční sítě .....	60
Obr. 9: Architektura navrženého modelu .....	62
Obr. 10: Dekompozice hustoty dopravy na jednotlivé směrové složky .....	70
Obr. 11: Poptávka na území ČR: výsledek modelu z rov. 7.....	72
Obr. 12: Příklad objektu vytvořeného pomocí wireframe mesh v prostředí MATLAB. 73	
Obr. 13: Vztah grafových a geodetických vzdáleností .....	76
Obr. 14: Srovnání stromu nejkratších cest a minimální kostry grafu .....	78
Obr. 15: Dílčí hodnoty $r_{max}$ pro jednotlivé service area .....	80
Obr. 16: Navržené hodnoty $r_{max}$ pro různé hodnoty $d_{max}$ a pro různé zastoupení podílu service area.....	82
Obr. 17: Převod hodnoty dopravy z shapefile formátu na uzlově definovanou dopravu 84	
Obr. 18: Prostorové rozložení poptávky po nabíjecí službě v ČR.....	86
Obr. 19: Časová variabilita poptávky – jednotlivé složky.....	90
Obr. 20: Exponenciální model vývoje počtu registrací ve vybraných zemích a v ČR... 92	
Obr. 21: Časový model poptávky .....	98
Obr. 22: Časový model poptávky – denní agregace a výkyvy vůči trendu .....	98
Obr. 23: Možné podoby funkce $\omega$ .....	107
Obr. 24: Příklad rozdělení nabíjecích událostí během dne; 1 stanice může obsluhovat pouze 1 vozidlo (vlevo); 1 stanice může obsluhovat více vozidel (vpravo) .. 109	
Obr. 25: Oblasti obsloužené existujícími stanicemi .....	117
Obr. 26: Počet dostupných nabíjecích konektorů .....	118
Obr. 27: Kumulativní dostupný výkon nabíjecích stanic .....	118
Obr. 28: Funkce hustoty pravděpodobnosti (vlevo), výstup Monte Carlo simulace navrženého generátoru diskrétních událostí (vpravo).....	121
Obr. 29: Grafické znázornění generátoru příjezdů <code>generateArrivals</code> .....	122
Obr. 30: Funkce hustoty pravděpodobnosti veličiny stav baterie (nahore) a veličiny kapacita baterie (dole) .....	123
Obr. 31: Grafické znázornění generátoru požadované kapacity nabíjení <code>SOCgenerator</code> .....	126
Obr. 32: Histogram délky nabíjecích událostí (transakcí), případová studie Nizozemsko 2014.....	127
Obr. 33: Předpokládané 3 funkce hustoty pravděpodobnosti $\rho_{XX}$ , $\rho_{YY}$ , $\rho_{ZZ}$ a jejich kumulativní vertikální součet $\rho_{CC}$ (vpravo dole) .....	128
Obr. 34: výstup Monte Carlo simulace navrženého generátoru délky nabíjecí události .....	129

Obr. 35: Grafické znázornění modelu interakce vozidel a stanic. ....	134
Obr. 36: Výsledky testu náhodnosti účelové funkce.....	151
Obr. 37: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, tic měření, 1-thread CPU .....	154
Obr. 38: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, profiler, 1-thread CPU	155
Obr. 39: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, tic měření, 4-thread CPU .....	156
Obr. 40: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, profiler, 4-thread CPU	157
Obr. 41: Použití výkonu grafické karty v běžných programech .....	158
Obr. 42: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, tic měření, GPU .....	159
Obr. 43: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce, profiler, GPU .....	160
Obr. 44: Příklad genotypu – standardní lineární tvar s vyznačenými body parsování jedinců (červeně) a stanic (modře) .....	164
Obr. 45: Příklad genotypu – stromová reprezentace navržené struktury genotypu populace .....	165
Obr. 46: Příklad fenotypu – stromová reprezentace reálné podoby populace .....	165
Obr. 47: Základní kostra pole vzniklé transformací stromové struktury populace .....	174
Obr. 48: Škála barevného kódování genotypu jedince.....	175
Obr. 49: Grafická demonstrace algoritmu CGA .....	176
Obr. 50: Výsledek optimalizace metodou CGA pro jedno období .....	182
Obr. 51: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období, výsledek pro Q1/2018.	184
Obr. 52: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období, výsledek pro Q2/2018.	185
Obr. 53: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období, výsledek pro Q3/2018.	185
Obr. 54: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období, výsledek pro Q4/2018.	186
Obr. 55: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období (popSize = 10), výsledek pro Q1/2018.....	187
Obr. 56: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období (popSize = 10), výsledek pro Q2/2018.....	187
Obr. 57: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období (popSize = 10), výsledek pro Q3/2018.....	188
Obr. 58: Výsledek optimalizace metodou CGA pro 4 období (popSize = 10), výsledek pro Q4/2018.....	188
Obr. 59: Odhady nákladů na různé typy nabíjecích stanic; shora dolů a zprava doleva: 1) domácí, 2) v garážích, 3) běžná na kraji silnice, 4) rychlá (DC) na kraji silnice (Zdroj: [225]).....	195

## Seznam tabulek

Tab. 1: Rozdělení typů osobních vozidel podle zdroje a zpracování energie.....	13
Tab. 2: Popis použitých atributů dat Sčítání dopravy .....	64
Tab. 3: Technické parametry výpočetního PC.....	67
Tab. 4: Vybrané hodnoty $r_{max}$ podle vztahu z rov. 12.....	81
Tab. 5: Parametry nabíjecí stanice .....	104
Tab. 6: Ilustrativní výstup generátoru příjezdů <code>generateArrivals</code> .....	121
Tab. 7: Očekávané reálné rozpětí hodnot dílčích kritérií.....	149
Tab. 8: Váhové koeficienty normalizace a priority .....	150
Tab. 9: Výsledky měření časové náročnosti účelové funkce: 1-thread CPU.....	153
Tab. 10: Souhrn přínosů paralelizace funkce <code>distDiminish()</code> .....	160
Tab. 11: Popis řídicích parametrů CGA .....	162
Tab. 12: Příklad genotypu populace .....	163
Tab. 13: Příklad fenotypu populace (odpovídá genotypu z tab. 12).....	163

## Přílohy

### Příloha 1: Specifika maticové reprezentace grafu

Toto je dodatečná kapitola mimo hlavní argumentační proud pojednávající o specifických vlastnostech reprezentace grafového modelu silniční sítě v prostředí MATLAB. Stručné představení problematiky proběhlo už při prezentaci první verze modelu v rámci [105]. Z toho důvodu bude kapitola obsahově z uvedené práce vycházet, bude však zároveň doplněna bohatší diskuzí a širší argumentací.

Úvodem je ovšem nutné vypořádat se s potenciální nejasností v použité terminologii. V předešlém nastínění modelu bylo řečeno, že problém CSPP je řešen v prostředí silniční sítě popsané grafem  $G(V, E, W)$ .

#### Některé obecné vlastnosti $G$

Na graf  $G(V, E, W)$  nejsou kladeny žádné další požadavky kromě již zmíněných: souvislost, neorientace a hranové ohodnocení grafu. Podmínka souvislosti zajišťuje, že neuvažujeme takové silniční sítě, ve kterých by bylo nemožné v jejich rámci cestovat mezi libovolnými dvěma uzly. Příkladem takové silniční sítě by byla silniční síť celé planety Země. Je zřejmé, že v rámci takové silniční sítě se nelze dostat z uzlu  $\alpha$  umístěného v Severní Americe do uzlu  $\beta$  umístěného v Evropě. Rigorózní podmínkou souvislosti by pak byla existence sledu pro  $\forall(x, y): V \times V$ , kde  $x, y \in V$ .

Podmínka ohodnocení hran je odůvodněna následovně: Prvky  $E$  reprezentují lineární zjednodušení skutečných silničních úseků, jejichž délku reprezentuje odpovídající prvek z  $W$ . Proto platí, že každá hrana má právě jednu váhu, tedy každému prvku z  $E$  odpovídá právě jeden prvek z  $W$ , tj. existuje zobrazení  $W: E \rightarrow \mathbb{R}$ . Zároveň zřejmě platí, z definice grafu, že  $\forall e_i \in E$  platí alternativní zápis  $e_i = \{v_k, v_l\}$ , kde  $v_k, v_l \in V$ . Tedy že každou hranu grafu  $G$  lze jednoznačně popsat dvojicí uzlů, které hrana spojuje.

Podmínka neorientovaných hran je zavedena proto, že odpovídá realitě a v zásadě zjednodušuje celý problém. Model má popisovat síť silnic mezi aglomeracemi, nikoliv síť obecních ulic. Cesty, jak by se dala nazývat množina sjednocující silnice a ulice, podléhají omezení nejen fyzické povahy (šířka, délka, kvalita povrchu), ale též povahy legislativní (omezená rychlost, provoz omezený typem vozidla, hmotností, rozměry, směrem jízdy atp.). Podmnožina silnic této množiny cest je legislativně omezena zpravidla rychlostně, případně rozměrem či hmotností (tunely, mosty). Silnice nebývají omezovány směrem jízdy, a pokud ano, pak se omezení vztahuje na obousměrný provoz (zákaz vjezdu). Takové silnice však mohou být z analýzy předem vyloučeny, jelikož pro praktické účely přepravy neexistují. Jednosměrné omezení provozu bývá podstatně méně časté u silnic než u ulic a to v takové míře, že existenci jednosměrných silnic lze zanedbat. Zde je potřeba podotknout, že i dálnice a rychlostní silnice s fyzicky odděleným směrem dopravy se počítají jako obousměrné komunikace.



Na  $G$  nejsou kladeny žádné podmínky z hlediska topologie. V tomto směru lze uvažovat dvě krajní varianty možné topologie grafu z hlediska hustoty [234]. V případě nejnižší možné hustoty, při dodržení podmínky souvislosti (a implicitně i neexistence orientovaných hran), je takovým grafem strom  $G_T(V, E_T)$ , u něhož platí  $|E_T| = |V| - 1$ , kde  $E_T$  je množina hran stromu a  $V$  je množina uvažovaných uzlů. V případě nejvyšší možné hustoty je takovým grafem úplný graf  $G_C(V, E_C)$ , u něhož platí  $|E_C| = \frac{1}{2}|V|(|V| - 1)$ , kde  $E_C$  je množina hran úplného grafu. Pro  $G$  tedy musí nutně platit  $|E_T| \leq |E| \leq |E_C|$ .

Toto je podmínka nutně platná, avšak zbytečně obecná pro grafy reprezentující reálnou silniční síť. Bez zjevných logických problémů lze tuto nerovnost zpřesnit empiricky podloženou úvahou. Pokud existuje mezi dvěma uzly  $v_i, v_j \in V$  cesta (tj. sled, ve kterém se neopakují uzly)  $p_a(v_i, v_j)$  a současně cesta  $p_b(v_i, v_j)$ , přičemž  $p_a \neq p_b$ , pak musí platit  $|E_T| < |E|$ . Různé cesty mezi dvojicí uzlů zjevně v grafu reálné silniční sítě běžně existují, přičemž toto tvrzení lze opřít o empirickou zkušenost. Podobná úvaha platí i pro horní hranici. Redundantní přímé spojnice mezi vzdálenými obcemi, mezi kterými existuje cesta, je zřejmě možné ignorovat, neboť se v realitě nevyskytují. Říkáme, že graf je úplný, jestliže  $\forall v_i, v_j \in V$ , kde  $v_i \neq v_j$  existuje hrana  $e_{ij}$ , kde  $e_{ij} \in E$ . V opačném případě, tedy při neexistenci alespoň jedné z přímých spojníc mezi každými dvěma uzly, je  $G$  neúplný. Při rostoucím počtu uzlů bude graf silniční síť řídnout, a pro reálnou silniční síť velkého rozsahu (síť ČR) bude zřejmě platit [234]:

$$|E_T| < |E| \ll |E_C| \quad \text{Rov. I}$$

V krátkosti se lze ještě pozastavit nad prvky  $V$ . Ty spadají do několika kategorií.  $V_1$  je množina uzlů stupně 1, tedy  $\deg(v \in V_1) = 1$ .  $V_1$  jsou *koncové uzly*, nejčastěji obce, do nichž vede pouze jedna uvažovaná silnice.  $V_2$  je množina uzlů stupně 2, tedy  $\deg(v \in V_2) = 2$ .  $V_2$  jsou *spojovací uzly*, popisné body jediné silnice bez větvení, která je dána více hranami.  $V_3$  je množina uzlů stupně vyššího než 3, tedy  $\deg(v \in V_3) \geq 3$ . Jde se o klasické *křižovatky*, tedy spojnice silničních úseků. Jejich maximální stupeň není definován.

### Data a maticová interpretace $G$

Data popisující aktuální podobu silniční sítě jsou dostupná na požádání z [140]. Data jsou poskytována ve formátu .shp, tzv. shapefile formátu společnosti ESRI [194]. Jedná se o strukturovaný datový formát používaný v kartografii k popisu reálných objektů, například území, řek, či silnic pomocí polygonů. Shapefile data je možné relativně snadno číst a v některých případech transformovat do různých alternativních popisných formátů. Shapefile polygon silniční sítě by ze své podstaty měl být snadno zaměnitelný s popisem silniční sítě pomocí grafu. Pokud není, hrany polygonu na sebe například nenavazují, pak je v datech chyba a je třeba ji odstranit.

Graf  $G$  je možné reprezentovat několika různými, avšak obsahově totožnými způsoby. Vedle polygonu je možné použít grafického znázornění pomocí čar a bodů, intuitivního

a často používaného v teorii grafů. Taková reprezentace je však nevhodná pro počítačové zpracování. Mnohem vhodnější je z tohoto pohledu matice sousednosti (adjacency matrix), případě seznam sousednosti (adjacency list). Obě tyto struktury jsou datová pole předem známé velikosti, rozdíl mezi nimi je v datovém typu prvků pole a v celkové potřebné alokované velikosti paměti při různých typech  $G$ . Matice sousednosti grafu  $G(V, E, W)$  je pole velikosti  $|V| \times |V|$  s prvky datového typu boolean (velikost 1 bit), tudíž vyžaduje  $\frac{|V|^2}{8}B$  paměti pro obecný typ grafu (orientovaný i neorientovaný). Seznam sousednosti  $G$  je pole obsahující  $2|E|$  celočíselných prvků, opět pro obecný typ grafu. Seznam sousednosti totiž obsahuje informace pouze o existujících hranách, kterých je  $|E|$ . Nemá ale možnost rozlišit hrany orientované a neorientované, proto musí obsahovat, podobně jako matice sousednosti, explicitní záznam pro každou orientaci hrany zvlášť. Významná úspora paměti při užití seznamu sousednosti vznikne až u velkých řídkých matic, kdy platí nerovnost z rov. I.

Matice sousednosti i seznam sousednosti obsahují shodně  $|E_d| + 2|E_{und}|$  efektivních hodnot, kde  $E_d \subseteq E$  je množina orientovaných hran a  $E_{und} \subseteq E$  je množina neorientovaných hran. V případě, že  $G$  obsahuje pouze neorientované hrany (splněno v předpokladech) a neobsahuje smyčky (splněno triviálně), pak matice sousednosti  $G$  potřebuje efektivně  $\frac{|V|(|V|-1)}{16}B$ . Protože však dvourozměrné čtvercové pole matice je třeba alokovat celé, předpoklad neorientovaných hran celkovou velikost pole neovlivní. Seznam sousednosti je na tom podobně, předpoklad neorientovaných hran velikosti pole nijak nepomůže, naopak pole bude mít maximální možnou velikost. Možná úspora paměti nastane až ve třetím případě, kdy bude uvažován tzv. řídký formát matice sousednosti.

Tři ekvivalentní reprezentace hypotetického neorientovaného grafu v rov. II demonstrují rozdíly mezi klasickým formátem  $A_F$  (full) matice sousednosti, souřadnicovým (COO) formátem matice sousednosti  $A_S$  (sparse) vhodným pro řídké matice [235], a seznamem sousednosti  $A_L$  (list).

$$A_F = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad A_S = \begin{pmatrix} (2,1) & 1 \\ (3,1) & 1 \\ (4,1) & 1 \\ (1,2) & 1 \\ (1,3) & 1 \\ (4,3) & 1 \\ (1,4) & 1 \\ (3,4) & 1 \end{pmatrix}, \quad A_L = \begin{pmatrix} (2,3,4) \\ (1) \\ (1,4) \\ (1,3) \end{pmatrix} \quad \text{Rov. II}$$

Je zřejmé, že formáty  $A_S$  a  $A_L$  jsou oproti  $A_F$  rozdílné v tom, že explicitně uchovávají informace pouze o existujících hranách. Z toho důvodu jsou při platnosti rov. I oba tyto formáty úspornější než  $A_F$ . Současně platí, že  $A_L$  je většinou úspornější než  $A_S$ , jelikož množství indexů, které musí  $A_L$  uchovávat, je při symetričnosti  $A_F$  (neorientaci grafu) nižší než to, které musí uchovávat  $A_S$ . Konkrétně jde o vztah III v případě, když

uvažujeme podmínky a), b), jelikož lze třetí sloupec vynechat, alternativně jde o vztah IV, pokud uvažujeme podmínky a), c).

a) Spojitý graf, tedy každý sloupec nebo řádek musí obsahovat alespoň jednu nenulovou hodnotu.

b) Pravá matice sousednosti obsahující pouze boolean hodnoty.

c) Obecná matice COO formátu, kde třetí sloupec obsahuje libovolnou skalární hodnotu.

$$|A_L| \leq 2|A_L| \leq |A_S| \quad \text{Rov. III}$$

$$|A_L| \leq 3|A_L| \leq |A_S| \quad \text{Rov. IV}$$

Prozatím uvedené argumenty naznačují, že z hlediska různých typů datových struktur by bylo optimální použít seznam sousednosti, který výkonnostně mírně předčí matici sousednosti v plném i řídkém formátu. Ze širšího pohledu je nicméně jeho vedoucí pozice neudržitelná. Vhodnost datových struktur musí být uvedena do souvislosti s prostředím, ve kterém budou tyto struktury vytvářeny a manipulovány. Tímto prostředím je MATLAB a ten přímou podporu seznamu sousednosti neposkytuje. Poskytuje sice obecnou strukturu typu buňka, kterou je možné seznam sousednosti vytvořit také, ale pole buněk obsahující vektory je z hlediska alokované paměti dokonce větší než běžné matice. To ovšem není největší nevýhoda seznamu sousednosti. Jak bylo již řečeno, uvažovaný graf  $G(V, E, W)$  je ohodnocený. Matice a seznam sousednosti s ohodnocením hran nepočítají, ukládají pouze informaci o propojeních hran a vrcholů. Jestliže bude přistoupeno k úkolu spojit ohodnocení hran s informací o propojení hran a vrcholů, pak matice sousednosti v plném i řídkém formátu nebude mít s takovou transformací problém. Naopak seznam sousednosti takové transformace není schopen bez větších zásahů do jeho logiky.

Matice sousednosti v obou formách používá k reprezentaci existence hrany binární hodnotu uloženou ve svém prvku, přičemž dva indexy tohoto prvku identifikují dva odpovídající vrcholy. Není proto žádný problém transformovat každý prvek matice sousednosti z datového typu boolean na datový typ např. double precision float. Tím se zajistí, že každá hrana může nést informaci o své délce, přičemž absence hrany může být kódována již libovolně, jako 0, NaN či záporné číslo. V seznamu sousednosti je však existence hrany reprezentována indexem, resp. existencí indexu v rámci seznamu. Samotná hodnota prvku matice není nikde explicitně uložena, takže prvek matice není možné použít jako nositele informace o délce hrany. Tato vlastnost znemožňuje použít seznam sousednosti pro uchování kompletní informace o grafu  $G(V, E, W)$ , což jej činí prakticky nepoužitelným.

Krátce lze ještě zmínit explicitní podmínku vhodnosti řídkého formátu matice proti plnému formátu. Řídkých formátů existuje několik, vedle uvažovaného seznamu souřadnic COO ještě například tzv. Compressed Sparse Columns (CSC), který je dokonce úspornější [235]. Platí totiž, že řídká matice v COO formátu je úspornější než plná, pokud  $3|E| < |V|^2$ . Zároveň platí, že řídká matice v CSC formátu je úspornější než plná, pokud

$2|E| + |V| < |V|^2$ . Protože  $|E| < |V|$  platí pouze u stromu, pak u libovolného grafu, který není stromem, platí  $2|E| + |V| \leq 3|E|$ . Tedy pokud uvažovaný graf není strom, pak CSC formát je alespoň tak úsporný, jako COO formát.

## Příloha 2: Atribut dojezdové vzdálenosti

I přes pozitiva, kterými PEV disponují v očích jejich příznivců, má elektromobilita jisté stinné stránky. Nejčastěji citovaný a diskutovaný je problém dojezdové vzdálenosti [207] [236]. Pokusme se ho nyní zevrubně rozebrat. Omezená dojezdová vzdálenost je nutně inherentní vlastnost každého nezávisle pohybujícího se dopravního prostředku. Všechny automobily, letadla, lodě mají určitou kapacitu zásobníku paliva – úložiště energie. V automobilech se spalovacím motorem je to velikost palivové nádrže. Tuto kapacitu lze, podobně jak je to zvykem u elektromobilů, přepočítat na dojezdovou vzdálenost (*range*). Ta se ve spojitosti s ICEV příliš často neuvádí, jelikož je z běžného uživatelského hlediska obvykle dostatečná. Lze ji snadno vypočítat z uváděné spotřeby v litrech na 100 km a objemu palivové nádrže. Dá se obecně říct, že dojezdová vzdálenost se u běžných osobních ICEV pohybuje většinou kolem 1000 km, případně méně u silnějších typů motorů. Proč ji ovšem uživatelé neberou v potaz, když omezená evidentně je. Tato dojezdová vzdálenost je totiž dostatečná pro drtivou většinu uživatelů při jejich způsobu využívání vozidla, je snadno a rychle obnovitelná (čerpací stanice) a rozšiřitelná (prostým a finančně nenáročným zvětšením nádrže se zvýší dojezdová vzdálenost). Jistě existují lidé, kteří potřebují vozidla s vyšší dojezdovou vzdáleností, jelikož doplňování paliva nemohou nebo nechťejí provádět často. Na druhé straně jistě existují lidé, kteří mají možnost, či jsou ochotni doplňovat palivo častěji. Zde je nutné upozornit na významný rozdíl. Preference a) doplňovat palivo častěji z důvodu vázání finančních prostředků utracených za palivo se liší od ochoty b) podstoupit nutnost doplňovat palivo častěji z důvodu nižší kapacity nádrže. Případ a) se váže pouze k časové preferenci čerpání vlastních finančních prostředků, přičemž jejich vynaložená výše se nemění. Uživatel vystupující v případě b) je ochoten pořídit vozidlo s menší kapacitou nádrže pouze tehdy, obdrží-li za to finanční kompenzaci ve formě levnější ceny vozidla oproti vozidlu s kapacitou větší, jejich vynaložená výše se změnit musí. Je racionální se totiž domnívat, že uživatel bude preferovat, při výběru z dvou naprosto výkonnostně totožných i naprosto stejně drahých vozidel, to s větší kapacitou nádrže. Nehledě na jeho ochotu vzdát se za finanční kompenzaci části kapacity nádrže.

Vztah je možné zachytit jako funkci uvedených proměnných.

$$R = f(b, p, t, e) \quad \text{Rov. V}$$

$R$  (*range*) je hodnota rozhodující metriky určující vhodnost daného vozidla ve smyslu dojezdové vzdálenosti.  $b$  (*behavior*) je proměnná determinující uživatelské běžné chování ve smyslu žádané dojezdové vzdálenosti, tedy určitým způsobem vyjádřené preference uživatele vztahující se k dojezdové vzdálenosti.  $p$  (*refuel possibilities*) jsou prostorově vztahované možnosti doplnění zásobníku energie.  $t$  (*refuel time*) je čas potřebný

k doplnění zásobníku energie.  $e$  (*extension costs*) jsou náklady na zvětšení zásobníku energie.

Proměnnou  $R$  pak popíšme deklarovanými veličinami takto: Čím vyšší má uživatel vozidla potřebu dojezdové vzdálenosti  $b$ , tím nižší bude vhodnost vozidla při jinak konstantních parametrech. Čím hustěji bude prostor, kde se uživatel s vozidlem pohybuje, vyplněn nabíjecími příležitostmi  $p$ , které dané vozidlo může využívat, tím lépe. Čím rychleji ( $t$ ) bude zkoumané vozidlo schopno naplnit svůj zásobník energie, tím lépe. Čím vyšší budou náklady na zvětšení zásobníku energie vozidla  $e$ , tím hůře.

Takto definované vztahy pak můžeme v nejjednodušší formě zapsat jako:

$$R(b, p, t, e) = \frac{p \cdot t}{b \cdot e} \quad \text{Rov. VI}$$

čímž dostáváme určitou základní verzi vztahu, který může sloužit jako metrika konkurenceschopnosti vozidel využívající různé typy energie. Můžeme tak teoreticky porovnávat uživatelskou atraktivitu ICEV vůči PEV (potažmo hybridů, kde bychom museli vztah ještě generalizovat pro  $n$  různých typů energie v rámci jediného vozidla).

### Příloha 3: Seznam funkcí modelu

Kategorie / Název funkce / Název skriptu	Popis
<b>Optimalizační model nabíjecí infrastruktury pro elektromobily</b>	<b>Velikost: 118,6 kB</b>

<b>Kapitola 6: Model poptávky po nabíjecí službě</b>		<b>Velikost: 38,5 kB</b>
blh2xy.m	Transformace souřadnic z S-JTSK do WGS-84.	
constructDemand.m	Vizualizace uměle generované poptávky pro účely ladění.	
custRound.m	Speciální funkce zaokrouhlení.	
dopravaANDtrafficFinalMerge.m	Spojení databáze silnic s databází hustoty dopravy.	
dopravaUseky2uzlyTest.m	Testovací transformace .shp úseků na uzly.	
examineRmax.m	Vizualizace hodnoty $R_{max}$ z předchozích výpočtů.	
extractDemand.m	Testovací extrakce úseků a uzlů z .shp formátu.	
getCRborder.m	Získání a transformace souřadnic územních celků ČR.	
getGeodeticDist.m	Výpočet geodetické vzdálenosti mezi dvěma body.	
getRmax.m	Výpočet hodnoty $R_{max}$ .	
graph2meshgridDistances.m	Převod grafové vzdálenosti na vzdálenosti mesh modelu.	
mainDoprava.m	Hlavní skript výpočtu a vizualizace dopravy.	
mainFullConstruct.m	Hlavní skript výpočtu a vizualizace vzdáleností uzlů, varianta výpočet.	
mainFullLoad.m	Hlavní skript výpočtu a vizualizace vzdáleností uzlů, varianta načtení dříve vypočtených, uložených dat.	
maxDemSat.m	Doplnění nesaturované poptávky.	
modelGraphicPattern.m	Testovací vizualizační skript.	

trafficApprox.m	Testovací transformační skript.
trafficDataLoad.m	Nahrání, transformace a vizualizace dopravy.
wgs2jtsk.m	Transformace souřadnic z WGS-84 do S-JTSK.

<b>Kapitola 7: Model nabídky nabíjecí služby</b>		<b>Velikost: 23,8 kB</b>
CSdownload.m	Stažení aktuální verze databáze nabíjecích stanic z OpenChargeMap.org.	
CSmodel.m	Hlavní funkce modelu nabídky nabíjecí služby.	
CSomegaFunction.m	Funkce omega ochoty uživatelů PEV cestovat.	
CStransformData.m	Čištění a transformace stažených dat.	
parseXML.m	Transformace XML formátu na MATLAB formát struct (1).	
xml2struct.m	Transformace XML formátu na MATLAB formát struct (2).	

<b>Kapitola 8: Simulátor nabíjení</b>		<b>Velikost: 29,3 kB</b>
assignDemand.m	Přiřazení poptávky na podkladový mesh, výpočet vzdáleností, paralelizace celého procesu na CPU a GPU.	
carArrivalGenerator.m	Generátor příjezdů vozidel ke stanicí.	
carDepartureGenerator.m	Generátor odjezdů vozidel od stanice.	
customRNG.m	Vlastní generátor náhodných čísel podle dané PDF.	
demand2meshgrid.m	Tvorba meshu a přiřazení poptávky na mesh.	
distDiminish.m	Výpočet matice vážených vzdáleností mezi uzlem sítě a stanicí.	
generateArrivals.m	Generátor příjezdů, vizualizace a uložení výsledků.	
GPUgeodeticDistance.m	Paralelizovaný výpočet geodetické vzdálenosti.	
h2m.m	Přepočítání hodin na minuty.	
infrastructureStats.m	Výpočet a agregátor ukazatelů výsledků nabíjecích událostí.	
jtsk2gps.m	Transformace souřadnic z S-JTSK do WGS-84.	
m2h.m	Přepočítání minut na hodiny.	
mainEVmarket.m	Model dlouhodobé časové složky poptávky.	
prepTimeDemandModelData.m	Příprava spojení časových poptávkových modelů.	
queueModel.m	Hlavní funkce simulátoru nabíjení.	
scrCustomPlot.m	Tvorba a uložení grafů skutečné a simulované PDF dopravy.	
scrFullYearDemandVariability.m	Transformace a spojení dílčích PDF dopravy.	
SOCfunction.m	Generátor SOC funkce z parametrů trhu elektromobilů.	
SOCgenerator.m	Generátor SOC funkce pro přijíždějící vozidla.	
stationSimulator.m	Model interakce vozidel a stanic.	
testCustomRNG.m	Testovací generátor náhodných čísel.	
timeDemandModel.m	Hlavní funkce dlouhodobého časového modelu poptávky.	
timeDemandModelMerge.m	Spojení časových poptávkových modelů a vizualizace.	

<b>Kapitola 9: Optimalizační model</b>		<b>Velikost: 11,0 kB</b>
determinismTest.m	Test determinismu (variability hodnot) účelové funkce.	

displayResults.m	Sumarizace a zobrazení výsledků optimalizace – jedno období.
displayResultsMultiplePeriods.m	Sumarizace a zobrazení výsledků optimalizace – více období + vytvoření GIFu pro všechny kvartály současně.
displayResultsMultiplePeriodsSingleQ.m	Sumarizace a zobrazení výsledků optimalizace – více období + vytvoření PNG obrázků pro samostatné kvartály.
fullRepublicCoverTest.m	Ověření pokrytí povrchu ČR nabíjecí službou.
MAIN.m	Hlavní spouštěcí skript celého procesu optimalizace (celého modelu).
mainObjectiveFunction.m	Účelová funkce optimalizačního modelu.

<b>Kapitola 10: Optimalizační metody</b>		<b>Velikost: 16,0 kB</b>
addNewStations.m	Otestuje a v případě potřeby vygeneruje novou stanici.	
GAnormalCrossover.m	CGA operace genetického křížení.	
GAnormalEnrichPop.m	Vygeneruje nového jedince a přidá ho do genotypu.	
GAnormalMutation.m	CGA operace genetické mutace.	
GAnormalReproduction.m	Řídící funkce genetické reprodukce.	
GAnormalSelection.m	CGA operace genetické selekce.	
GAnormalSolver.m	CGA solver pro jedno období.	
GAnormalSolverMultiplePeriods.m	CGA solver pro více období.	
genotype2phenotype.m	Překlad genotypu jedince na jeho fenotyp.	
getRandomGenotype.m	Vygeneruje nový náhodný genotyp jedince.	

## Příloha 4: Příklady funkcí modelu

### Funkce `mainObjectiveFunction.m`

```
function [fval] =
mainObjectiveFunction(stationSet,rmax,timeSpan)
% main function, evaluate performace of given full set of
stations
% (both existing and new ones)
global onePopTime
% dmax = 50;

ID = tic;
disp('Initializing calculation.')
oldFolder = cd(E:\Disk Google\Věda\Články aktuálně
rozpracované\Charging station simulator');
[unassignedDemand, weightedDistance, utilisationRate,
denialRate, SAunion, XI, YI] =...

queueModel(stationSet,timeSpan,rmax);
cd(oldFolder);

onePopTime = horzcat(onePopTime,toc(ID));
%% criterion 1
% test if a point is in borders of Czech Republic
% variable result must be equal zero to be fully covered by SA
```

```

oldFolder = cd('..');
[nonCoveredFractionOfCR,CRarea] = fullRepublicCoverTest(SAunion,
XI, YI);
cd(oldFolder);

ID = tic;
% get the weighted distance from meshgrid demand cell to nearest
station
% + get fraction of unassigned demand
weightedDistance(~CRarea) = nan;
totalDistanceValue = nansum(nansum(weightedDistance));

% summarized criterion 1 parts
crit_1_1 = nonCoveredFractionOfCR; % SA coverage rate;
crit_1_2 = unassignedDemand; % unsatisfied demand fraction;
crit_1_3 = totalDistanceValue; % demand-weighted distance from
demand cells to nearest station;

%% criterion 2
crit_2_1 = 1 - utilisationRate; % utilisation of charging
station slots
crit_2_2 = denialRate; % denial rate of incoming vehicles
toc(ID)

%% merge objective criteria
normVector = [2 2 0.001 1 5];
% this means:
% crit_1_1 and crit_1_2 are of the highest priority
% then there are crit_2_1 and crit_2_2
% and the lowest priority has crit_1_3
priorityVector = [100 100 1 10 10];

normalizedCriteria = normVector.*priorityVector.*[crit_1_1
crit_1_2 crit_1_3 crit_2_1 crit_2_2];
fval = sum(normalizedCriteria);
end

```

### **Funkce GAnormalSelection.m**

```

function [Y,remainingPopulation] = GAnormalSelection(X,popFval)
% operation of genetic selection for GAnormalSolver
% selects pairs of individuals from the population

selRate = 0.5;
selNum = 2*floor(ceil(selRate*length(popFval))/2);

[~, fvalSortOrder] = sort(popFval);
sortedX = X(fvalSortOrder);

YY = sortedX(1:selNum);
if selNum < length(popFval)
    remainingPopulation = sortedX(selNum+1:end);
elseif selNum == length(popFval)
    remainingPopulation = sortedX(end);
else

```



```

        error('Chyba!');
    end

    % create reproduction pairs
    tmp = randperm(length(YY));
    for i=1:length(tmp)/2
        Y(i,:) = YY(tmp(2*i-1:2*i));
    end
end
end

```

### **Funkce distDiminish.m**

```

function [C,I,Cdist,M,dist] =
distDiminish(station,XGrid,YGrid,dmax,swtch)

% calculates distance diminishing mesh matrix M for one station
% requires:
% station position vector
% meshgrid of distances
% dmax
% [M] = distDiminish(station,XGrid,YGrid,dmax)

%% MULTIPLICATIVE INVERSE FUNCTION
% c = 4; % koeficient "prohnutí" funkce
% y = (1+1/c)./(c*x+1)-1/c; % SPECIFIED FUNCTION HERE
%%

if swtch == 1 || swtch == 2
    R = 6378.135;
    % geodetic distance - normal + CPU paralel approach
    dist =
R*acos(cosd(XGrid).*cosd(station(1))+sind(XGrid).*sind(station(1)
)).*cosd(YGrid-station(2)));

    t = dist./dmax;
    % tmp = (1+1/c)./(c*t+1)-1/c; % ADD SPECIFIED FUNCTION HERE
    % tmp(tmp<0) = nan;
    tmp = 1-t;
    tmp(tmp<0) = nan;
    M = tmp;

    C = nan;
    I = nan;
    Cdist = nan;

elseif swtch == 3
    % geodetic distance - GPU approach (not CUDA)

    gXGrid = gpuArray(XGrid);
    gYGrid = gpuArray(YGrid);
    % gDmaxInv =
(1/dmax)*parallel.gpu.GPUArray.ones(size(XGrid));
    gDmaxInv = gpuArray(1/dmax);
    tMax = parallel.gpu.GPUArray.zeros(size(XGrid));
    % tMax = gpuArray(0);

```

```

distMin = 1000*parallel.gpu.GPUArray.ones(size(XGrid));
%     distMin = gpuArray(1000);
tInd = parallel.gpu.GPUArray.zeros(size(XGrid));
k = parallel.gpu.GPUArray.ones(size(XGrid));

for i=1:length(station)

    %     [tMax, distMin,tInd,k] =
GPUgeodeticDistance(station(i,1),station(i,2),gXGrid,gYGrid,gDma
xInv,ons,tMax,distMin,tInd,k);

    [tMax, distMin,tInd,k] =
arrayfun(@GPUgeodeticDistance,station(i,1),station(i,2),...
        gXGrid,gYGrid,gDmaxInv,tMax,distMin,tInd,k);
    end
    C = gather(tMax);
    Cdist = gather(distMin);
    I = gather(tInd);

    M = nan;
    dist = nan;
end
end

```

**Příloha 5: Ukázka vzorku vstupních dat (ŘSD průzkum dopravy 2010)**

Atribut	1	2	3	4
<b>Geometry</b>	Line	Line	Line	Line
<b>BoundingBox_1</b>	-739995.0975	-739995.0975	-738969.75	-737625.8334
<b>BoundingBox_2</b>	-738969.75	-739475.42	-738069.0856	-736200.4618
<b>BoundingBox_3</b>	-1055666.875	-1055624.0242	-1057073.1797	-1059960.8742
<b>BoundingBox_4</b>	-1055624.0242	-1053953.6416	-1055666.875	-1057815.2553
<b>X_1</b>	-739995.0975	-739475.4200000	-738969.75	-737625.8334
<b>X_2</b>	-739482.423799	-739735.25869999	-738955.4375	-737150.709399998
<b>X_3</b>	-738969.75	-739995.0975	-738512.261500	-736675.585499998
<b>X_4</b>	NaN	NaN	-738069.0856	-736200.461800002
<b>X_5</b>			NaN	NaN
<b>X_6</b>				
<b>Y_1</b>	-1055624.0242	-1053953.6416	-1055666.875	-1057815.2553
<b>Y_2</b>	-1055645.4496	-1054788.833	-1055716.125	-1058530.4616
<b>Y_3</b>	-1055666.875	-1055624.0242	-1056394.6523	-1059245.6679
<b>Y_4</b>	NaN	NaN	-1057073.1797	-1059960.8742
<b>Y_5</b>			NaN	NaN
<b>Y_6</b>				
<b>CIS_SU</b>	1-0016	1-0017	1-0020	1-0035
<b>ADMINJ</b>	CZ020A	CZ020A	CZ020A	CZ020A
<b>POC_USNASU</b>	1242A24308124 2A059	1242A250 1242A24309	1242A059 1242A060	1242A238121242A 23807
<b>KON_USNASU</b>	1242A24308124 2A059	1242A250 1242A24309	1242A060 1242A007	1242A238091242B 007
<b>SUKONVUZLU</b>	K	K	K	K
<b>ST_ZACSUUS</b>	0	0	0	215
<b>ST_KONSUUS</b>	1404	305	1691	2295
<b>DELKA_SU</b>	1404	305	1742	2564
<b>LN</b>	1224	1363	869	430
<b>NSN</b>	263	237	229	79
<b>SN</b>	408	627	463	179
<b>SNP</b>	15	97	68	30
<b>TN</b>	164	273	202	132
<b>TNP</b>	199	85	105	24
<b>A</b>	151	156	236	56
<b>AK</b>	14	7	37	12
<b>TR</b>	2	10	9	9
<b>TRP</b>	0	0	0	3
<b>TV</b>	2440	2855	2218	954
<b>O</b>	14175	14049	13552	6645
<b>M</b>	367	89	101	89
<b>SV</b>	16982	16993	15871	7688
<b>TNV</b>	1850	2036	1845	691
<b>ALFA</b>	0	1.06	1.05	0
<b>BETA</b>	1.19	0.96	1	1.03
<b>CYKLISTE</b>	28	57	42	49
<b>POMER_SM1</b>	0	77	73	0
<b>POMER_SM2</b>	0	23	27	0
<b>SILNICE</b>	603	603	603	603
<b>C_KOM</b>	603	603	603	603
<b>KOD_TR_KOM</b>	3	3	3	3
<b>VYM_TAHY</b>				
<b>ADM_OSTAT</b>				
<b>K1</b>	1	1	1	1

<b>K2</b>	3	3	3	3
<b>PORADI_US</b>	6	1	7	19
<b>ZU</b>	vyús. přivaděče Vestec k R1	hr.Prahy	vyús.10114	x s R1, Jesenice
<b>KU</b>	vyús.10114	vyús. přivaděče Vestec k R1	vyús.101	hr.okr.Pha-vých.a Pha-záp.