

DODATKY K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

# **Optimalizace rozmístění stanic pro nabíjení elektrických vozidel**

*David Beinhauer*

28. září 2022



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úpravy v programu</b>	<b>5</b>
1.1	Oprava načítání mapy . . . . .	5
1.2	Úpravy v simulátoru . . . . .	5
1.2.1	Informace o simulaci . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Analýza výsledků experimentů</b>	<b>7</b>
2.1	Parametry simulátoru . . . . .	7
2.2	Parametry chybové funkce . . . . .	8
2.3	Výsledky experimentů . . . . .	9
2.3.1	Náhodné rozmístění stanic . . . . .	9
2.3.2	Optimalizační metody . . . . .	11



# Kapitola 1

## Úpravy v programu

### 1.1 Oprava načítání mapy

V programu z adresáře `map_preprocessing` jsme opravili chybu v převodu jednotek u délek jednotlivých silnic. A vytvořili opravené vstupní soubory simulátoru z adresáře `prepared_map`. V opravené reprezentaci jsou již v souborech `edges.txt` a `prepared_edges.txt` uloženy vzdálenosti v kilometrech.

Dále jsme při extrakci mapy z OpenStreetMaps pomocí nástroje Osmium zahrnuli do výběru silnic, také silnice reprezentující nájezdy a výjezdy z dálnic, silnic pro motorová vozidla a silnic 1. třídy (přidáním silnic typu, jehož postfix je `_link`). Opravená mapa již obsahuje sjezdy a nájezdy na zvolené typy silnic. Takto upravená silniční síť má po odstranění vrcholů stupně 2, celkem 8477 vrcholů a 10906 hran. Mapa se rozpadá na 22 komponent souvislosti. Rozpad je způsoben malými úseky silnic v pohraničních oblastech, které byly vlivem extrakce mapy odpojeny od silniční sítě. S malými komponentami souvislosti nakládáme stejně jako v původní variantě (napojíme je k nejbližšímu vrcholu).

### 1.2 Úpravy v simulátoru

V simulátoru jsme z důvodu lepší výpočetní efektivity změnili způsob výběru nabíjecí stanice. V nové variantě si před začátkem simulace předpočítáme nejbližší nabíjecí stanici pro každou křižovatku v silniční síti. V momentě, kdy se vozidlo rozhodne jet na nabíjecí stanici, přeplánuje trasu tak, aby mířilo na předpočítanou nejbližší nabíjecí stanici od křižovatky, v níž se aktuálně nachází. Původní variantu lze zprovoznit odkomentováním označených úseků v souboru `Map.cpp`.

Dále jsme v optimalizaci pomocí k-means zjednodušili výpočet vah křižovatek. V nové implementaci je váha křižovatky rovna součtu průměrných hladin baterie potřebných pro nabití vozidla na přilehlých silnicích. Změnu jsme provedli, neboť

jsme při spuštění optimalizační metody narazili na přetékání vah z důvodu velmi malých hodnot.

Navíc jsme řádně přenastavili základní nastavení, které je nyní nastaveno na nastavení simulátoru používané v experimentech.

Také jsme narazili na chybu ve výpisu doby trvání jedné trasy, proto v optimalizaci naprosto vynecháváme tento parametr (ve výpočtu loss funkce).

### **1.2.1 Informace o simulaci**

Do simulátoru jsme navíc přidali výpis dalších informací pro podrobnější popis výsledků simulace. Mezi přidané informace patří informace vytížení jednotlivých nabíjecích stanic (počet zákazníků a průměrná doba čekání vozidel ve frontě na stanici).

Dále jsme přidali výpis počtu vozidel, které ukončily cestu. Dojezd do cílové destinace a návrat z cílové destinace do počátku považujeme za 2 různé cesty. Každé vozidlo by tedy v ideálním případě mělo přispět do tohoto počtu dvakrát. Vyjímkou jsou vozidla, které se vybily, či nestihly dojet do cíle před skončením simulace. Tyto vozidla do tohoto počtu nepřispívají. Na konci simulace by tedy tento počet měl být roven přibližně dvojnásobku všech vygenerovaných vozidel.

Mezi další přidané informace patří počet vozidel, které nestihly dojet do cíle před doběhnutím simulace, počet vozidel, jež se vybily během cesty na nabíjecí stanici, a celkový počet vozidel, které nedorazily do cílové destinace (vybily se nebo skončila simulace).

Nakonec jsme dodali také podrobnější přehled o všech nabíjecích stanicích. Přidali jsme informaci o počtu stanic, které byly aspoň jednou během simulace využity a výpis počtu zákazníků a průměrné doby nabíjení na jednotlivých stanicích.

# Kapitola 2

## Analýza výsledků experimentů

### 2.1 Parametry simulátoru

Ve všech experimentech jsme spouštěli simulace dopravy na dobu 5000 minut, neboli simulovali jsme dobu 3 dny 11 hodin a 20 minut. Zvolili jsme střední hodnotu času mezi výjezdy vozidla jako 0.1 minuty. Tedy každou minutu vyjede přibližně 10 nových vozidel. Jedna tato simulace běžela na stroji s procesorem AMD Ryzen™ 5 2500U<sup>1</sup> přibližně 4 minuty.

Silniční síť jsme si rozdělili na hrany délky 1 km (1 segment). Vzhledem k úpravě ze sekce 1.2 volíme vždy nejbližší nabíjecí stanici od aktuální křižovatky (nevybíráme z množiny kandidátů). Spotřebu vozidla volíme jako 0.002 z celkové hladiny baterie za minutu a rychlost vozidla volíme jako 1 km/min (60 km/hod). Tedy dojezd vozidla s maximální kapacitou je 500 km.

Střední hodnotu normální distribuce popisující počáteční hladinu baterie jsme zvolili jako 0.9 s rozptylem 0.2. Tuto volbu si můžeme odůvodnit buď skutečností, že se vozidlo při výjezdu nestihlo nabít na plnou kapacitu. Předpokládáme, že doba nabíjení vozidla z domova trvá hodiny a v případě po sobě jdoucích dlouhodobých cest v krátkém horizontu se baterie nemusí plně dobít. Minimální výjezdová hladina baterie je zvolena jako 0.5. V simulátoru tedy mohou vyjždět vozidla s počáteční hladinou v rozmezí 0.5 (dojezd 250 km) až 1 (dojezd 500 km). V případě, že je odhadovaná hladina baterie v cílové destinaci menší než 0.05, pak vozidlo také vyráží na nabíjecí stanici. Pokud je navíc hladina baterie menší než 0.5 pak se vozidlo musí vždy rozhodnout zda vyrazí na nabíjecí stanici, či ne a od tohoto okamžiku již nesmí změnit svou trasu do doby než dorazí do cílové destinace, či na nabíjecí stanici.

Dále volíme dobu čekání na úplné nabití vozidla jako 40 minut a každá nabíjecí stanice má celkem 4 nabíjecí sloty (paralelně se můžou nabíjet 4 vozy).

---

<sup>1</sup><https://www.amd.com/en/products/apu/amd-ryzen-5-2500u>

V experimentech jsme porovnávali výsledky s následujícími počty rozmístěných stanic: 100, 300, 500, 700, 1000, 2000, 4000

Vlastnosti simulátoru popisované výše nastavíme s pomocí následujících hodnot parametrů (až na počet stanic všechny odpovídají základnímu nastavení parametrů programu):

```
"simulationTime" : [5000],
"segmentLength" : [1],
"numClosestStations" : [1],
"carConsumption" : [0.002],
"numStations" : [100, 300, 500, 700, 1000, 2000, 4000],
"stationCapacity" : [4],
"exponentialLambdaCities" : [0.005],
"exponentialLambdaDepartures" : [10],
"endCityRatio" : [1],
"batteryTresholdLambda" : [20],
"carBatteryMean" : [0.9],
"carBatteryDeviation" : [0.2],
"carStartBatteryBottomLimit" : [0.5],
"chargingTreshold" : [0.5],
"notChargingTreshold" : [0.9],
"batteryTolerance" : [0.05],
"carVelocity" : [1],
"chargingWaitingTime" : [40],
"meanChargingLevel" : [0.5]
```

## 2.2 Parametry chybové funkce

V chybové funkci, jež používáme pro optimalizaci, jsme zvolili parametr pro počet stanic 100, pro počet vybitých vozidel také 100. Použití jedné nabíjecí stanice tedy odpovídá vybití jednoho vozidla. Použitím těchto hodnot parametrů zajistíme, že optimalizační algoritmy nebudou cíleně umísťovat velké množství nabíjecích stanic jen za účelem eliminovat všechny vybité vozidla v simulaci. Pokud by parametr pro počet nabíjecích stanic nebyl dostatečně velký, pak by optimální řešení bylo rozmístit nabíjecí stanici na každou možnou pozici, toto řešení je však zjevně špatné a nerealistické. Naopak, pokud by byl parametr pro počet vybitých vozidel malý oproti počtu stanic, pak by neoptimálnějším řešením bylo nepoužít žádnou stanici bez ohledu na to, že se vybijí velké množství vozidel. Tento postup je však také zjevně špatný.

Parametr pro trvání cesty zanedbáváme, protože v simulátoru vhodně nepopisuje naši požadovanou hodnotu. Jeho hodnotu tak volíme jako 0.

Pro rozdíl hladin baterie volíme hodnotu 1 (nabývá hodnot z rozmezí -1 až 1, tedy ovlivní loss pouze minimálně).

Parametr pro dobu čekání na nabíjecí slot volíme jako 1, jelikož v optimálním řešení chceme, aby vozidla nečekala na nabíjecí stanici nerealisticky dlouho. Tato vlastnost však zjevně není stejně závažná jako počet stanic či vybitých vozidel, proto volíme hodnotu tohoto parametru poměrně malou. Pro představu jedno vybité vozidlo považujeme za stejně závažnou závadu, jako průměrné čekání vozidel 100 minut v řadě na nabíjecí slot. S ohledem na naše nastavení počtu nabíjecích slotů slouží tento parametr pouze k eliminaci extrémních případů (např. jediná nabíjecí stanice v řešení). Nepřipadá nám reálné, že se zvoleným počtem stanic a počtem jejich nabíjecích slotů bude docházet k extrémně dlouhým čekacím dobám.

Parametry chybové funkce jsou tedy následující:

```
"stationNumberParameter" : [100],  
"runDownParameter" : [100],  
"durationParameter" : [0],  
"batteryDifferenceParameter" : [1],  
"waitingTimesParameter" : [1]
```

## 2.3 Výsledky experimentů

Kompletní výsledky experimentů a použité parametry lze nalézt v repozitáři práce v odpovídajících podadresářích (dle volby metody) v adresáři:

```
final_version/analysis_results
```

Nové parametry se nacházejí v adresářích s názvem (v odpovídajících adresářích optimalizačních metod, viz. předchozí odstavec):

```
parameters1
```

Nové výsledky experimentů lze nalézt v souborech s názvem (v odpovídajících adresářích optimalizačních metod):

```
results1.txt
```

### 2.3.1 Náhodné rozmístění stanic

Experimenty na modelech, v nichž jsme rozmísťovali nabíjecí stanice náhodně stejným přístupem jako v případě generování počátečních pozic vozidel (pravděpodobnost počátečního města je závislá na počtu obyvatel, samotná pozice ve

městě je pak vygenerována uniformně nahodně), slouží především k porovnání náhodného přístupu vůči optimalizačním metodám a k otestování správného chování simulátoru.

Průměrný počet vybitých vozidel v simulacích (přes všechny zvolené počty stanic, jež popisuje sekce 2.1) je 2965.86. Průměrný počet vozidel, které dokončily svou cestu (dojezd do cíle a návrat do startu považujeme za 2 odlišné cesty) je 89872.9 a průměr vozidel, které nestihly dokončit svou trasu (simulace skončila), je 2252. Tyto počty přibližně korespondují s očekávaným počtem vozidel v simulaci, který je 50000 (přibližně 10 vozidel vyjede za 1 minutu) a celkově očekávaným počtem tras 100000 (každé vozidlo má naplánovány vždy 2 trasy (tam a zpět)). Vozidla, jež nedorazily do cílové destinace (vybily se nebo nestihly dojet), mohly být ve své první cestě (v budoucnu by přispěly 2 krát do celkového počtu tras), nebo mohly být na cestě zpět do počátku (v budoucnu by přispěly jednou). Celkový počet tras vozidel při započtení nedokončených tras tedy je v rozmezí 95091 a 100308. Toto rozmezí přibližně odpovídá počtu očekávaných cest popsanych výše (asi 100000). Počet vybitých vozidel klesá s rostoucím počtem nabíjecích stanic na mapě, počet dokončených cest naopak roste (očekávaný průběh).

Na počet vybitých vozidel lze nahlížet jako na počet neúspěšných cest do cílové destinace. Neúspěšných cest do cílové destinace je tedy přibližně 3.2%. Vzhledem k tomu, že ne všechny vozidla vyrážejí s plnou kapacitou baterie (v nejhorším případě i s hladinou 0.5, tedy s dojezdem 250 km), průměrná vzdálenost do cíle je 200 km (tedy s poměrně velkou pravděpodobností překračuje také vzdálenost 250 km) a také, že může být nabíjecí stanice vzdálená (jejich pozice jsou náhodné), předpokládáme, že poměr vybitých vozidel a úspěšných cest rozumně odpovídá vlastnostem simulovaného modelu. V neposlední řadě je třeba také do předpokládaného počtu vybitých vozidel započítat počet vybití způsobených pouze aproximativní volbou nejvhodnější nabíjecí stanice.

U průměrné doby čekání na nabíjecí slot nepozorujeme výraznou závislost na počtu stanic. Tuto skutečnost si odůvodňujeme dostatečně velkým počtem nabíjecích slotů na nabíječkách, který vede k malé pravděpodobnosti přeplnění nabíjecí stanice (pravděpodobně by bylo možné celkový počet nabíjecích slotů na stanicích snížit).

Z pohledu využitelnosti stanic můžeme sledovat trend, že s rostoucím počtem narůstá počet stanic, jež nebyly za celou dobu simulace použity. Pro porovnání v případě 100 umístěných stanic bylo využito 95 stanic. V případě 4000 umístěných stanic však bylo použito pouze 1358 stanic.

Podrobné výsledky popisuje tabulka 2.1.

$N$	$R$	$t$	$F$	$NotF$	$N_{used}$
100	4104	4.28264	88361	2006	95
300	3742	7.33916	89050	2092	259
500	3377	7.58291	88679	2125	400
700	3137	8.45333	89505	2218	522
1000	2801	7.4205	90789	2239	643
2000	2148	6.60937	90902	2538	982
4000	1452	5.56316	91824	2546	1358
1228.57	2965.86	6.75015	89872.9	2252	608.429

**Tabulka 2.1** Výsledky simulace při náhodné rozmístění stanic a různých počtech umístěných stanic.  $N$  - počet umístěných stanic,  $R$  - počet vybitých vozidel,  $t$  - průměrná doba čekání na nabíjecí slot,  $F$  - počet dokončených cest vozidel (buď dojezd do cíle, nebo návrat do počáteční pozice),  $NotF$  - počet vozidel, které nestihly dokončit svou cestu (simulace dobehla),  $N_{used}$  - počet nabíjecích stanic, využitých aspoň 1 vozidlem. Poslední řádek tabulky vyobrazuje průměrné hodnoty.

### 2.3.2 Optimalizační metody

S ohledem na potřebu odevzdat analýzu výsledků co nejdříve, jsme bohužel byli nuceni spouštět optimalizační metody na parametrech vyžadující kratší dobu výpočtu, což je znatelné především u optimalizace genetickým algoritmem, která pracuje s malou populací a malým počtem generací.

#### Hladový algoritmus

Pro optimalizaci hladovým algoritmem jsme použili rozdíl loss pro ukončení optimalizace 100, maximální počet iterací 5 a rozhodli jsme se porovnávat variantu, kdy odebíráme v každém kroku 1, 5 a 10 stanic. Parametry simulátoru jsou tedy:

```
"lossDifferenceTreshold" : [100],
"greedyMaxIterations" : [5],
"greedyNumThrowAway" : [1, 5, 10]
```

U této optimalizační metody očekáváme zredukování počtu nabíjecích stanic s přibližným zachováním počtu vybitých vozidel oproti náhodnému řešení. Z výsledků lze vyzorovat mírný pokles počtu vybitých vozidel oproti náhodné variantě (náhodná změna nepoužívaných stanic pravděpodobně mírně optimalizuje rozmístění stanic). Zajímavý je však znatelný pokles v době čekání na stanicích, který je 4.75052 oproti 6.75015 v náhodné variantě. Toto zlepšení může být způsobeno výhodnějším rozmístěním pozic stanic.

Podrobnější výsledky hladové optimalizace viz. tabulka 2.2.

$N$	$R$	$t$	$F$	$NotF$	$N_{used}$	$Num_{throw}$
97	3975	2.32103	88994	1936	97	10
97	3964	2.39562	88236	1974	94	1
100	4056	1.32837	88014	1948	98	5
285	3651	2.3415	88275	1991	234	5
300	3679	3.60535	89284	2035	254	1
300	3662	3.58768	88867	2099	255	10
480	3428	7.14107	88962	2110	337	5
480	3440	3.1488	88733	2052	364	10
500	3347	3.75678	88741	2045	400	1
680	3169	4.50716	88417	2126	448	10
700	3107	4.39188	89225	2132	511	5
700	3177	4.34124	89255	2116	510	1
995	2771	5.85256	89629	2303	570	5
1000	2752	6.27729	89820	2178	640	1
1000	2712	6.42694	89425	2214	647	10
2000	2129	7.20114	91496	2428	992	5
2000	2024	7.10672	91419	2391	997	1
2000	2028	7.22709	91860	2441	994	10
3960	1252	5.54454	92185	2702	1365	10
3980	1293	5.66007	91998	2648	1360	5
3996	1274	5.59811	92022	2751	1360	1
1221.43	2899.52	4.75052	89755.1	2220	596.524	-

**Tabulka 2.2** Výsledky hladové optimalizace.  $N$  - počet umístěných stanic,  $R$  - počet vybitých vozidel,  $t$  - průměrný doba čekání na nabíjecí slot,  $F$  - počet dokončených cest vozidel (buď dojezd do cíle, nebo návrat do počáteční pozice),  $NotF$  - počet vozidel, které nestihly dokončit svou cestu (simulace doběhla),  $N_{used}$  - počet nabíjecích stanic, využitých aspoň 1 vozidlem,  $Num_{throw}$  - počet stanic pro vyřazení v jedné iteraci hladové optimalizace. Poslední řádek tabulky vyobrazuje průměrné hodnoty.

## Genetický algoritmus

V experimentech zkoumající genetický algoritmus jsme uvažovali velikost populace 10 jedinců, počet generací 10 nebo 20, výběr do další generace buď 0 nebo 4 nejlepší jedince, pravděpodobnost lepší volby v turnajové selekci 0.7 a 0.9, pravděpodobnost mutace stanice v jedinci 0.0001, 0.001 a 0.01 (odpovídají změně jednotek stanic v jedinci) a rozptyl velikosti jedince jako 10 (pro mutaci velikosti jedince). Vlastnosti popsané výše lze zapsat jako parametry simulátoru následovně:

```
"geneticPopulatioSize" : [10],  
"geneticNumGenerations" : [10, 20],  
"geneticNumBestSelection" : [0, 4],  
"geneticTournamentSelectionTreshold" : [0.7, 0.9],  
"geneticMutationTreshold" : [0.0001, 0.001, 0.01],  
"geneticMemberSizeVariance" : [10]
```

S ohledem na množství dat vypisujeme pouze výsledky pro 20 generací jedinců a volbu v turnajové selekci 0.9, tyto výsledky popisuje tabulka 2.3. Dále ještě vypisujeme průměrné výsledky přes všechny experimenty genetické optimalizace, jež popisuje tabulka 2.4. Kompletní výsledky všech variant lze nalézt v repozitáři práce v souboru:

```
final_version/analysis_results/genetic_results/results1.txt
```

Z výsledků lze vypočítat pokles v průměrném počtu vybitých vozidel, který se oproti náhodné variantě snížil přibližně o 200. Z výsledků nepozorujeme výrazný rozdíl mezi počty generací. Paradoxně pozorujeme mírný nárůst v počtu vybitých vozidel pro 20 generací oproti 10 (2765.51 oproti 2710.02). K více vypovídajícím výsledkům optimalizace by bylo pravděpodobně potřeba zvolit větší velikost populace a počet generací. Větší populaci ani více generací bohužel s ohledem na dobu potřebnou pro simulaci nejsme schopni v takto krátkém časovém horizontu otestovat.

## K-Means

Optimalizaci pomocí k-means jsme zkoumali pro 10, 20, 50 a 100 iterací jednoho běhu algoritmu k-means a pro 2, 4 a 8 generací modelů (nové rozmístění dáno algoritmem k-means). Popsané parametry odpovídají následujícímu nastavení parametrů:

```
"kMeansNumIterationsOneRun" : [10, 20, 50, 100],  
"kMeansNumGenerations" : [2, 4, 8]
```

$N$	$R$	$t$	$F$	$NotF$	$N_{used}$	$k$	$p_{mut}$
100	3780	10.516	87694	1922	96	0	0.0001
102	3908	10.2046	88078	1994	97	4	0.0001
103	3764	9.46858	88384	2018	100	0	0.001
103	3926	11.0876	88475	2008	98	0	0.01
115	3854	5.79085	88147	2040	112	4	0.001
115	3751	3.30192	88538	1927	108	4	0.01
274	3458	9.90521	88444	2070	238	0	0.0001
295	3532	11.8291	88603	2116	257	0	0.001
300	3508	12.4332	88898	2111	259	4	0.01
300	3487	10.8039	88423	2132	269	0	0.01
300	3422	9.32823	88972	2089	263	4	0.0001
315	3509	10.4224	89288	2215	267	4	0.001
500	3228	8.65577	88440	2203	406	4	0.001
501	3173	9.66791	88779	2186	416	0	0.01
502	3323	12.5844	89096	2219	411	4	0.01
503	3337	11.4031	89175	2186	402	0	0.001
503	3063	9.57502	89556	2195	398	0	0.0001
515	3231	8.75649	89871	2195	417	4	0.0001
695	2811	8.46304	89841	2173	503	4	0.001
695	3100	8.03058	89489	2300	534	4	0.0001
700	2851	7.84887	90047	2246	540	0	0.001
700	3043	7.47431	89244	2159	536	0	0.01
701	2869	8.94443	89310	2195	524	4	0.01
707	2934	9.07718	89309	2243	517	0	0.0001
1000	2738	3.79662	90087	2247	660	4	0.01
1001	2485	4.61707	89980	2329	663	4	0.001
1005	2719	4.8092	89858	2331	665	0	0.001
1005	2573	5.63284	90245	2302	668	0	0.01
1005	2645	5.37003	89645	2175	648	4	0.0001
1007	2528	6.45747	90407	2359	653	0	0.0001
1995	2049	4.58184	90885	2294	972	0	0.0001
2001	1879	6.52862	91329	2532	972	4	0.0001
2001	1932	6.25605	91617	2483	1005	0	0.01
2001	1905	7.17545	91049	2406	985	4	0.01
2007	1946	5.93023	91276	2533	1029	4	0.001
2015	1957	5.39109	91145	2332	1030	0	0.001
4000	1313	5.24598	92159	2539	1318	0	0.001
4000	1391	5.17887	91853	2632	1372	0	0.0001
4001	1409	5.28531	91732	2626	1382	0	0.01
4003	1324	5.17288	92124	2628	1326	4	0.001
4003	1421	5.28883	92308	2549	1376	4	0.0001
4007	1262	4.20497	92116	2699	1373	4	0.01

**Tabulka 2.3** Výsledky optimalizace genetickým algoritmem pro 20 generací a pravděpodobnost 0.9 výběru jedince s lepší fitness v turnajové selekci.  $N$  - počet umístěných stanic,  $R$  - počet vybitých vozidel,  $t$  - průměrný doba čekání na nabíjecí slot,  $F$  - počet dokončených cest vozidel (buď dojezd do cíle, nebo návrat do počáteční pozice),  $NotF$  - počet vozidel, které nestihly dokončit svou cestu (simulace doběhla),  $N_{used}$  - počet nabíjecích stanic, využitých aspoň 1 vozidlem,  $k$  - počet nejlepších výsledků pro zkopírování do nové populace GA,  $p_{mut}$  - pravděpodobnost mutace jedné stanice.

$N$	$R$	$t$	$F$	$NotF$	$N_{used}$
1230.42	2737.77	7.35924	89842	2256.97	611.815

**Tabulka 2.4** Průměrné hodnoty výsledků genetické optimalizace.  $N$  - počet umístěných stanic,  $R$  - počet vybitých vozidel,  $t$  - průměrný doba čekání na nabíjecí slot,  $F$  - počet dokončených cest vozidel (buď dojezd do cíle, nebo návrat do počáteční pozice),  $NotF$  - počet vozidel, které nestihly dokončit svou cestu (simulace doběhla),  $N_{used}$  - počet nabíjecích stanic, využitých aspoň 1 vozidlem.

S ohledem na velké množství dat, vypisujeme pouze výsledky pro 4 generace modelů viz. tabulka 2.5. Dále průměrné hodnoty přes všechny experimenty popisuje tabulka 2.6. Všechny výsledky optimalizací lze nalézt podobně jako výsledky genetické optimalizace v souboru:

`final_version/analysis_results/kmeans_results/results1.txt`

Z výsledků experimentů nepozorujeme výraznější rozdíly oproti náhodnému přístupu.

### Shrnutí experimentů

Na základě experimentů pozorujeme, že optimalizace pomocí genetického algoritmu pro všechny varianty počtu nabíjecích stanic prokazovala lepší výsledky s ohledem na počet vybitých vozidel, než náhodný přístup viz. obrázek 2.1. Lze také pozorovat zlepšení pokud porovnáváme počet vybitých vozidel oproti počtu použitých stanic (s aspoň jedním zákazníkem) viz. obrázek 2.2. U hladového přístupu také pozorujeme mírné zlepšení v počtu vybitých vozidel. Naopak v optimalizaci algoritmem k-means nepozorujeme výraznější zlepšení. Zároveň lze pozorovat, že počet vybitých vozidel s rostoucím počtem využitých stanic stále téměř lineárně klesá (dodáním stanic, bychom pravděpodobně mohli stále zmenšit počet vybitých vozidel).

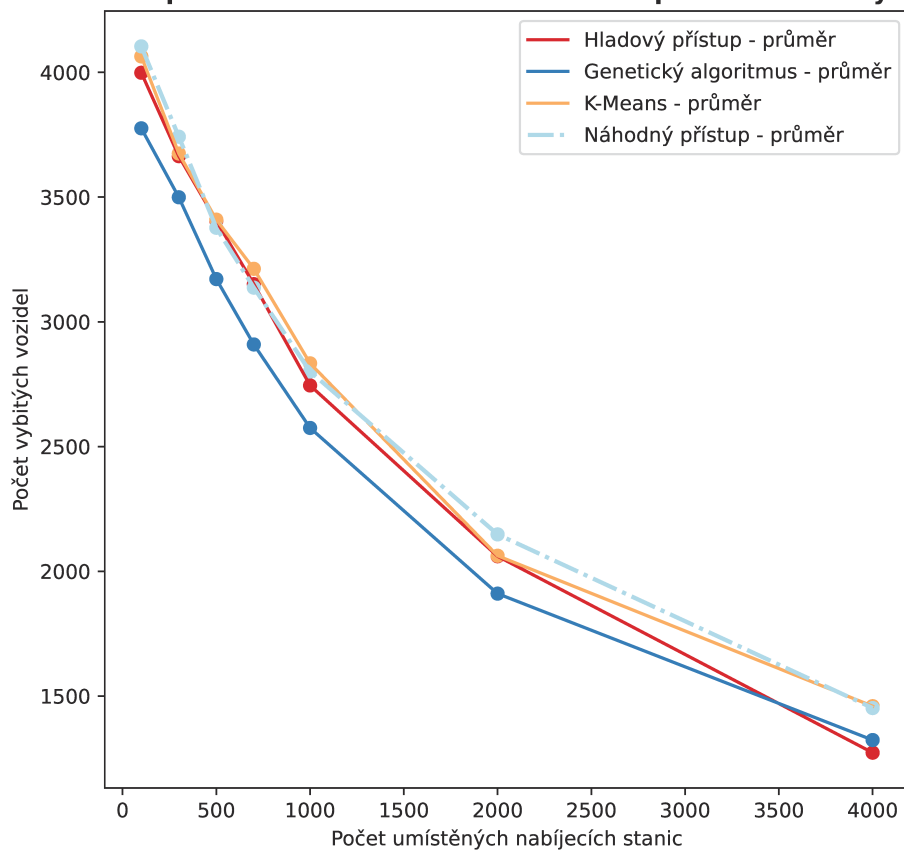
$N$	$R$	$t$	$F$	$NotF$	$N_{used}$	$means_{iter}$
100	4096	1.38225	87825	1946	99	100
100	4077	1.30409	87735	1903	99	10
100	4047	1.38378	87474	1891	96	20
100	4066	39.6314	87944	2045	82	50
300	3631	3.62546	87988	2060	264	10
300	3624	3.63952	89215	2075	258	50
300	3654	3.60941	89424	2059	256	100
300	3662	3.56158	88708	2054	258	20
500	3354	3.68823	88795	2059	396	50
500	3401	3.71918	88498	2057	407	20
500	3423	3.66761	88732	2098	398	10
500	3423	3.73438	89277	2015	403	100
700	3201	4.4829	88817	2138	512	10
700	3224	4.35161	89222	2082	503	100
700	3224	4.46481	89832	2095	510	50
700	3231	4.41606	89455	2186	515	20
1000	2905	9.42707	90328	2321	659	50
1000	2795	9.6101	89807	2315	624	20
1000	2830	9.42633	89649	2316	636	10
1000	2817	9.55537	89648	2381	639	100
2000	2013	7.07931	90210	2512	988	50
2000	2069	7.23059	91422	2406	995	20
2000	2010	7.16024	90630	2481	988	10
2000	2080	7.0893	91098	2457	994	100
4000	1472	5.64531	92225	2614	1374	100
4000	1470	5.8005	91731	2570	1332	10
4000	1487	5.76097	91316	2634	1326	20
4000	1478	5.72179	92006	2618	1357	50

**Tabulka 2.5** Výsledky optimalizace pomocí k-means pro 4 generace (4 různé rozmístění stanic).  $N$  - počet umístěných stanic,  $R$  - počet vybitých vozidel,  $t$  - průměrný doba čekání na nabíjecí slot,  $F$  - počet dokončených cest vozidel (buď dojezd do cíle, nebo návrat do počáteční pozice),  $NotF$  - počet vozidel, které nestihly dokončit svou cestu (simulace doběhla),  $N_{used}$  - počet nabíjecích stanic, využitých aspoň 1 vozidlem,  $means_{iter}$  - počet iterací algoritmu k-means.

$N$	$R$	$t$	$F$	$NotF$	$N_{used}$
1228.57	2959.43	6.46401	89672.9	2220.05	607.357

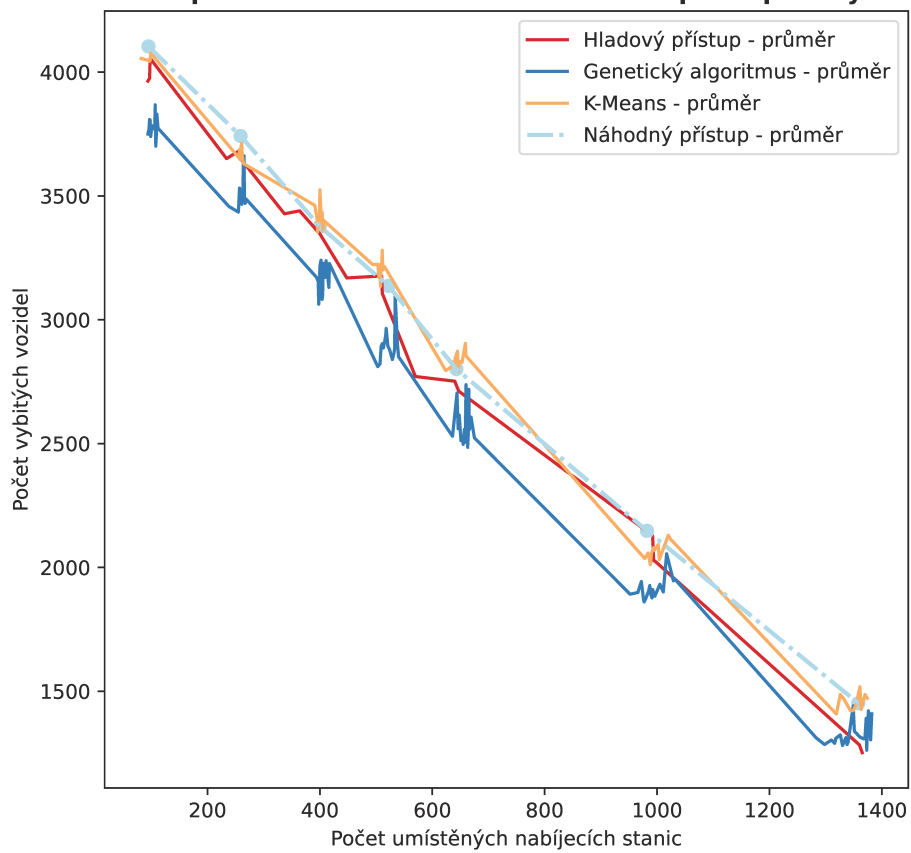
**Tabulka 2.6** Průměrné hodnoty výsledků optimalizace pomocí k means.  $N$  - počet umístěných stanic,  $R$  - počet vybitých vozidel,  $t$  - průměrný doba čekání na nabíjecí slot,  $F$  - počet dokončených cest vozidel (buď dojezd do cíle, nebo návrat do počáteční pozice),  $NotF$  - počet vozidel, které nestihly dokončit svou cestu (simulace doběhla),  $N_{used}$  - počet nabíjecích stanic, využitých aspoň 1 vozidlem.

### Porovnání optimalizačních metod s ohledem na počet rozmístěných stanic



**Obrázek 2.1** Porovnání různých optimalizačních metod. Optimalizační metody barevně rozlišujeme. Čárové grafy popisují průměrné hodnoty počtu vybitých vozidel při daném počtu nabíjecích stanic umístěných v dopravní síti. Čerchovaný čárový graf značí výsledky náhodného přístupu.

**Porovnání optimalizačních metod s ohledem na počet použitých stanic**



**Obrázek 2.2** Porovnání různých optimalizačních metod. Optimalizační metody barevně rozlišujeme. Čárové grafy popisují průměrné hodnoty počtu vybitých vozidel při daném počtu aspoň jednou použitých nabíjecích stanic v dopravní síti. Čerchovaný čárový graf značí výsledky náhodného přístupu.