

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Teplotní model trakční baterie

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin PAVÝZA**

Osobní číslo: **E15B0165P**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Teplotní model trakční baterie**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši metod modelování teploty trakční baterie.
2. Navrhněte strukturu simulačního modelu teplotního modelu baterie.
3. Odhadněte parametry simulačního modelu.
4. Zhodnoňte dosažené výsledky.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

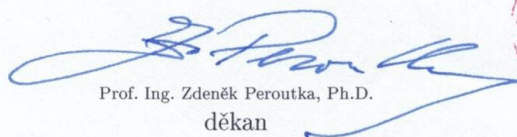
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Janda, Ph.D.

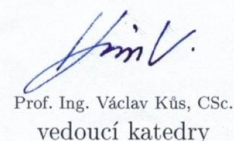
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na tvorbu teplotního modelu trakční baterie. Jejimi cíli jsou stručné představení možných metod tvorby teplotního modelu trakční baterie, návržení struktury vlastního modelu, určení jeho parametrů pro konkrétní baterii a vytvoření jednoduché simulace vývoje teploty baterie v reálném provozu.

Naprostá většina práce je řešena s využitím funkcí a skriptů v programu Matlab. Určení parametrů je řešeno nejprve srovnáváním vypočteného průběhu teploty baterie pro různé parametry s průběhem změřeným a později metodou nejmenších čtverců. V závěru jsou tyto metody vzájemně porovnány.

Simulace teploty je vytvořena pro nepřetržitý provoz na fiktivní trase s $\frac{2}{3}$ pokrytím trolejí v létě roku 2015.

Klíčová slova

Teplotní model, trakční baterie, simulace, Matlab, metoda nejmenších čtverců

Abstract

The bachelor thesis is focused on development of thermal model for traction battery. Its aim is to shortly introduce possible methods of thermal model design, to design an own thermal model structure of a traction battery, to determine its parameters for specific battery and to create a simple simulation of temperature development in real-life traffic.

Most of the thesis is solved by Matlab functions and scripts. Firstly the parameters are determined by simulating the battery temperature for different parameter values and comparing it with measured temperature, lately by the method of least squares. In conclusion, both methods are compared.

The simulation is created for continuous operation on a fictional route with $\frac{2}{3}$ trolley coverage in summer of 2015.

Key words

Thermal model, traction battery, simulation, Matlab, method of least squares

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 10.6.2019

Martin Pavýza

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Jandovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD.....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1. REŠERŠE.....	11
1.1 MODEL OTEPLENÍ PRO TRVALÝ NABÍJECÍ PROUD.....	11
1.2 OBECNÝ TEPLTNÍ MODEL TRAKČNÍ BATERIE.....	12
1.3 CFD SIMULACE.....	13
2. METODIKA ŘEŠENÍ.....	14
3. PRAKTICKÁ ČÁST.....	15
3.1 VÝBĚR DAT.....	15
3.2 NÁVRH MODELU.....	16
3.3 VARIANTA BEZ UVÁŽENÍ VNITŘNÍ TEPLoty.....	17
3.3.1 Počáteční předpoklady.....	17
3.3.2 Odhad α'_1	18
3.3.3 Určení vlivu tepelné kapacity k	18
3.3.4 Upřesnění hodnoty k	19
3.3.5 Upřesnění k a α'_1	20
3.3.6 Zhodnocení výsledků.....	21
3.4 VARIANTA S UVÁŽENÍ VNITŘNÍ I VNĚJŠÍ TEPLoty.....	23
3.4.1 Počáteční odhad parametrů.....	23
3.4.2 Upřesnění α'_1 a α'_2	24
3.4.3 Zhodnocení výsledků.....	27
3.4.4 Přepřepočování a rozšíření skriptu.....	28
3.4.5 Výsledky.....	30
3.5 METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ.....	31
3.5.1 Důvody použití.....	31
3.5.2 Odvození.....	31
3.5.3 Parametry skriptu.....	33
3.5.4 Výsledky.....	33
3.6 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ OBOU METOD.....	35
4. SIMULACE.....	36
5. ZÁVĚR.....	38
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	41
Přílohy – viz CD	

Úvod

Při uvádění do provozu hybridního autobusu 12H se začaly místy vyskytovat problémy s přehříváním baterie. V současné době dochází v celé Evropě k hromadnému nasazování parciálních trolejbusů, a proto, aby případné problémy mohly být odhaleny ještě před uvedením do provozu na dané trase, a aby mohla být případně navržena opatření k jejich předejití, má tato práce za úkol navrhnout obecnou strukturu teplotního modelu trakční baterie, který by mohl být využit k simulaci teploty v reálném provozu a určit jeho parametry pro konkrétní baterii na základě předložených dat získaných měřeními v reálném provozu.

Text je rozdělen do tří částí. První část představuje rešerši některých metod, které již byly nebo se předpokládá, že mohou být k tvorbě teplotního modelu trakční baterie použity.

V další části dochází k samotnému návrhu struktury teplotního modelu a stanovení jeho parametrů nejprve za použití simulace teploty pro různé hodnoty parametrů a jejího porovnání s naměřeným průběhem, později pak metodou nejmenších čtverců. Obě metody jsou realizovány za pomoci funkcí a skriptů v programu Matlab. V závěru pak dochází k porovnání těchto metod.

Posledním bodem práce je vytvoření jednoduché simulace vývoje teploty při dlouhodobém nepřetržitém provozu na smyšlené trase s 2/3 pokrytím trolejovým vedením.

Seznam symbolů a zkratek

Značení v práci	Značení ve skriptu	Význam
A	-	Plocha baterie
CFD	-	Computational Fluid Dynamics
C_b	-	Tepelná kapacita článků a přilehlých částí
C_i	-	Tepelná kapacita vzduchu uvnitř pouzdra baterie
C_c	-	Tepelná kapacita krytu bateriového kontejneru
C_p	-	Charakteristická tepelná kapacita
$dT; dT_{bat}$	dT	Změna teploty ($^{\circ}\text{C}$)
dt	dt	Změna času (s)
dt_{in}	dt1	Časový posuv vnitřní teploty
dt_{out}	dt2	Časový posuv vnější teploty
h	-	Koeficient přestupu tepla (obecný)
$H_{gen}; Q_{in}$	-	Teplo generované na odporech
I_{b1}	-	Celkový proud baterií
$I_{in}; I_{bat}$	nabíjeciproud(-Int)	Nabíjecí proud
I_{out}	vybíjeciproud(-Int)	Vybíjecí proud
k	c	Koeficient vlivu tepelné kapacity; Tepelná časová konstanta (pouze v rešerši)
m	-	Hmotnost
$P_i; P_{b1}$	-	Tepelný elektrický výkon
Q_a	-	Počáteční náboj baterie
Q_{max}	-	Maximální náboj baterie
R_{b1}	-	Celkový vnitřní odpor baterie
R_{bi}	-	Tepelný odpor mezi články a vnitřkem baterie
R_{co}	-	Tepelný odpor mezi pouzdem baterie a vnějškem
Rd_{Tin}	Rdt1	Změna nabíjecího odporu podle teploty ($\Omega/^{\circ}\text{C}$)
Rd_{Tout}	Rdt2	Změna vybíjecího odporu podle teploty ($\Omega/^{\circ}\text{C}$)
Rd_{SOCin}	RdSOC1	Změna nabíjecího odporu podle SOC ($\Omega/\%$)
Rd_{SOCout}	RdSOC2	Změna vybíjecího odporu podle SOC ($\Omega/\%$)
R_{ic}	-	Tepelný odpor mezi vnitřkem a pouzdem baterie
R_{io}	-	Tepelný odpor mezi vnitřním a vnějším vzduchem
$R_{in}; R_{bat}$	-	Jmenovitý vnitřní nabíjecí odpor baterie (Ω)
R_{out}	-	Jmenovitý vnitřní vybíjecí odpor baterie (Ω)
SOC	stav nabíjení(-Int)	Úroveň nabití baterie
T_a	-	Teplota okolí baterie
T_b	teplotabaterie(-Int)	Teplota baterie
T_{b1}	-	Průměrná teplota článků baterie
T_c	-	Teplota krytu
T_{fall}	-	Celkový pokles teploty
T_i	-	Teplota vzduchu uvnitř bateriového kontejneru
T_{in}	teplotavnitřni(-Int)	Teplota uvnitř vozu
$T_{out}; T_o$	teplotavnejsi(-Int)	Venkovní teplota
T_s	-	Vzorkovací čas
t	-	Čas
t_f	-	Doba do ustálení teploty při ochlazování
α'_1	alpha1	Koeficient přestupu tepla mezi baterií a vnějškem (již zahrnuje plochu)
α'_2	alpha2	Koeficient přestupu tepla mezi baterií a vnitřkem vozu (již zahrnuje plochu)

1. Rešerše

Zdrojů, které by se problematikou teplotních modelů trakční baterie zabývaly, je jen velmi málo a obvykle ani nejde o hlavní téma, vybral jsem však 2 případy, které stojí za zmínku.

1.1 Model oteplení pro trvalý nabíjecí proud

V [1] je teplotní model využit jako základ pro vhodnou regulaci nabíjení. Nutno říci, že s ohledem na svůj účel neřeší změnu teploty při vybíjení ani chladnutí bez proudu.

Teplotní model určuje okamžitou teplotu anodového konce baterie. Operační ztráty v průběhu nabíjení jsou sjednoceny do ohmických ztrát ve formě tepla. Generované teplo H_{gen} pak vyplývá ze vzorce

$$H_{gen} = \int i_{bat}^2 \cdot R_{bat} \cdot dt \quad (1.1)$$

Závislost odporu baterie na změně teploty byla zanedbána. Současný únik tepla a s ním spojený pokles růstu teploty je daný Newtonovým zákonem ochlazování.

$$\frac{dT_{bat}}{dt} = -k \cdot (T_{bat} - T_a) \quad (1.2)$$

Z této rovnice lze vyčíslit pokles teploty, který je dán vztahem

$$T_{fall} = (T_{ss} - T_a) \cdot (1 - e^{-k \cdot (t - t_r)}) \quad (1.3)$$

, kde k je teplotní koeficient baterie, t_f je čas, ve kterém baterie dosáhne tepelné stabilní teploty T_{ss} .

Pro další postup bude ještě potřeba znát rovnici pro výpočet stavu nabití baterie

$$SOC = \frac{Q_a + \int i_{bat} \cdot dt}{Q_{max}} \quad (1.4)$$

, kde Q_a je počáteční náboj baterie v Coulombech, Q_{max} je jmenovitá nabíjecí kapacita baterie v Coulombech a i_{bat} je okamžitý nabíjecí proud v Ampérech.

Pokud rovnice 1 a 4 zdiskretizujeme pro vzorkovací čas T_s , pak teplota elektrod baterie v průběhu nabíjení je dána vztahem

$$T_{bat}(n+1) = T_{bat}(n) + \left(\frac{R_{bat}}{m \cdot C_p}\right) \cdot T_s \cdot i_{bat}^2(n) - (T_{bat}(n) - T_a) \cdot (1 - e^{-k \cdot T_s}) \quad (1.5)$$

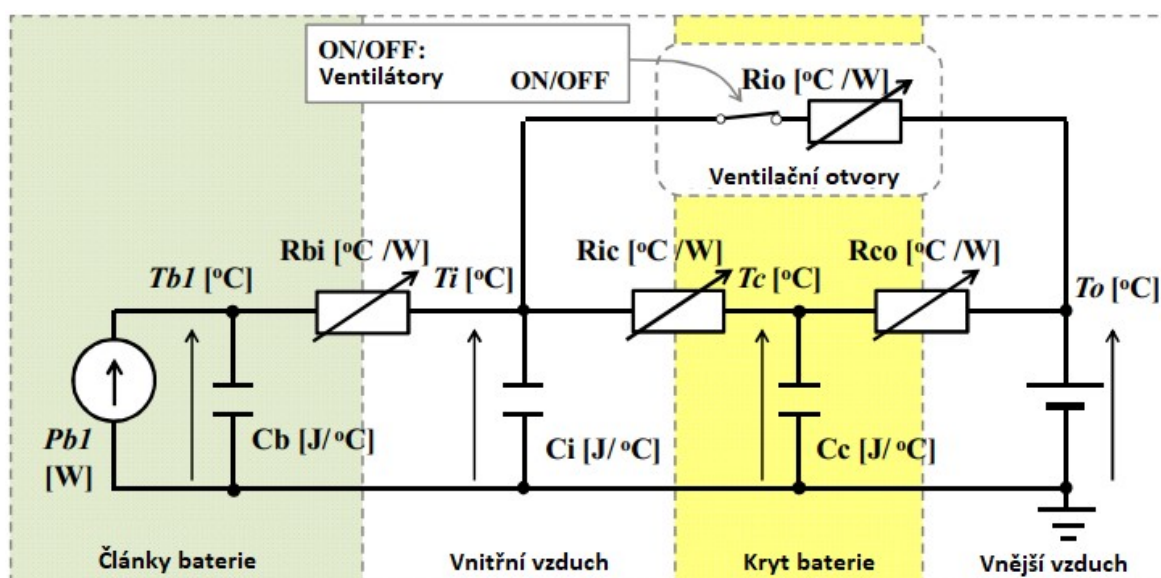
, kde m je hmotnost baterie a C_p je charakteristická tepelná kapacita. Třetí prvek rovnice značí pokles teploty v důsledku rozptýlení tepla. Tepelná časová konstanta k je vypočtena ze závislosti $k = hA/mC_p$, kde h je koeficient přestupu tepla a A je plocha baterie.[1]

1.2 Obecný teplotní model trakční baterie

[2] se snaží sestavit a otestovat jednoduchý teplotní model aplikovatelný na běžný provoz. Dá se říci, že se tento článek snaží přenést proces výroby tepla a jeho přestupu do okolí do podoby jakéhosi ekvivalentního „elektrického“ obvodu. Pro účely modelu stanovuje následující předpoklady:

- Všechny články baterie mají stejnou teplotu
- Vnější a vnitřní teplota vzduchu jsou ve všech bodech stejné
- Proudění vzduchu kolem všech článků baterie je stejné
- Teplota celého pouzdra baterie je ve všech bodech stejná

Počítá se zde s případem, kdy se v zájmu co nejlepšího výkonu a životnosti reguluje rozdíl teplot mezi jednotlivými články na velmi malou hodnotu. V opačném případě by podle autorů článku měl model obsahovat oddělené tepelné kapacity každého článku, popřípadě být vytvořený pomocí CFD (*Computational Fluid Dynamics*, viz kapitola 1.3).[2]



Obr. 1: Model tepelné sítě pro jeden bateriový kontejner[2]

Na základě uvedených předpokladů je teplotní model jednoho bateriového kontejneru zkonstruován podle Obr. 1, kde R_{bi} , R_{ic} , R_{co} a R_{io} jsou tepelné odpory mezi jednotlivými prostředími a C_b , C_i a C_c jsou tepelné kapacity těchto prostředí. R_{bi} , R_{ic} a R_{io} jsou závislé na ventilátorech připojených ke každému modulu. R_{ic} a R_{io} mohou být dále ovlivněny tepelnou izolací, pokud se v zimě používá. [2]

Tento model slouží k odhadu průměrné teploty článků. Teplotní odpor je vypočten ze stavu stabilní teploty při konstantním tepelném výkonu. Tepelné kapacity jsou odvozeny z fyzikálních materiálových konstant. Zbývající kapacita je vypočtena jako 1,5násobek výsledku získaného z ochlazování jednoho samostatného článku. Tento koeficient nahrazuje tepelnou kapacitu přilehlých částí jako mezičláňkové měděné pláty a plastové pouzdro bateriového modulu. [2]

Celkový tepelný výkon je daný vztahem

$$P_{b1} = R_{b1} \cdot I_{b1}^2 \quad (1.6)$$

1.3 CFD simulace

Druhý uvedený článek zmiňuje také CFD simulaci, která umožňuje přesně pracovat s distribucí tepla po jednotlivých modulech a článcích baterie, v článku je nicméně hodnocena jako neefektivní pro jeho účel. [3] o ní říká:

„Počítačová dynamika tekutin (Computational Fluid Dynamics, CFD) je moderní metoda, která se zabývá

- prouděním tekutin,
- přenosem tepla a hmoty,
- průběhem chemických reakcí,
- dalšími souvisejícími jevy v definovaném prostředí.

Pro použití CFD je třeba nejprve vytvořit model (virtuální prototyp zkoumaného systému), na který jsou následně aplikovány matematické postupy tak, aby byly ze zadaných okrajových a počátečních podmínek získány vybrané údaje o dějích probíhajících v celé zkoumané oblasti při respektování fyzikálních zákonů.“ [3, s. 2]

Výhodou této metody je možnost získat hodnoty pro každý bod zkoumaného objektu a to i pro podmínky, které nelze realizovat experimentálně. Je ale výpočetně náročná a vytvoření modelu by vyžadovalo podrobnější znalosti struktury baterie. [3]

2. Metodika řešení

Základem pro odhad parametrů teplotního modelu byla data získaná při provozu baterie v trolejbusu v období 20.12.2017-15.1.2018 a 16.8.2018-20.9.2018. Data obsahovala záznamy teploty baterie, teploty uvnitř a vně vozu, nabíjecího a vybíjecího proudu, stavu nabití baterie, času, kdy byl konkrétní záznam pořízen a některé další parametry, které však tato práce nevyužívá. Běžný časový odstup mezi dvěma záznamy byl v desetinách sekundy.

Data pocházela ze dvou tachografů, z nichž jeden zaznamenával teploty a stav nabití a druhý proudy. Data z jednotlivých tachografů byla uložena v samostatných souborech. Jelikož byly soubory zaznamenány v různých časech, prvním krokem bylo vytvoření funkce v Matlabu, která vybere dostatečně dlouhé úseky, kdy oba tachografy zaznamenávaly současně a uloží je do nových souborů.

Z počátku nebylo jasné, čím vším je teplota baterie ovlivňována, jako vhodný postup se proto stanovilo začít nejjednodušším možným modelem, který pracoval pouze s dodaným elektrickým teplem a vnější teplotou a postupně na základě výsledků přidávat další parametry, které se zdají být významné. Také byla z výpočtů z počátku vyloučena letní data, která mohla být ovlivněna sepnutím ventilátoru.

Na základě získaných výsledků byl model následně rozšířen nejprve o vliv teploty uvnitř vozu, později o časové posuny vnější i vnitřní teploty a rozšířen na všechny soubory. Z několika testovaných postupů byl jako nejperspektivnější pro stanovení parametrů vybrán skript v Matlabu, který počítal teoretický průběh teploty pro různé hodnoty parametrů a na základě porovnání s naměřeným průběhem vybral nejlepší variantu. Rozsah zkoumaných hodnot parametrů byl určen buď předchozími výsledky nebo řešením soustavy rovnic získaných z časových úseků s nulovými proudy a podle potřeby posunován.

Ve snaze o další zpřesnění výsledku byla řešena i závislost vnitřních odporů baterie na teplotě a na úrovni nabití. To by již s ohledem na výrazný růst výpočetní náročnosti v závislosti na počtu proměnných bylo velmi neefektivní řešit uvedenou metodou. Byla proto využita metoda nejmenších čtverců. Původní metodou zůstala řešena pouze zpoždění vnější a vnitřní teploty, která nebylo možné rozumně zapracovat do vzorce.

Na závěr byla vytvořena jednoduchá simulace založená na záznamech teplot z léta 2015 a předpokladu nepřetržitého provozu na jedné trase. Cílem bylo zjistit maximální teplotu, které by baterie v běžném provozu mohla dosahovat.

3. Praktická část

3.1 Výběr dat

Data z obou tachografů bylo nejprve potřeba projít a vybrat z nich časové úseky, ve kterých oba zaznamenávaly data současně. Dále bylo třeba vyloučit úseky dat, které jsou příliš krátké, nebo kde je mezi dvěma po sobě jdoucími záznamy výraznější časový odstup, jelikož větší množství chybějících dat zejména v úsecích s vyššími hodnotami proudu by mohlo vnést velmi výraznou chybu do navazujících výpočtů.

Za tímto účelem byl vytvořena funkce v Matlabu, která prošla postupně všechny soubory řazené podle času pořízení, vybrala z nich časové úseky, pro které byla dostupná data z obou tachografů a ty z těchto úseků, které měly délku alespoň 12 hodin a zároveň neobsahovaly mezery delší než minuta, pak uložila do nových souborů. Celý tento proces zabral téměř den výpočetního času, nicméně to pro další kroky bylo nezbytné.

V pozdější fázi práce bylo zjištěno několik nedostatků způsobených zdrojovými soubory:

- V datech se vzácně vyskytují hodnoty NaN, což výrazně komplikuje navazující výpočty. Tato chyba je ve funkci již opravena (nahrazeno poslední předchozí platnou hodnotou, popřípadě nejbližší následující platnou hodnotou, pokud jde o první hodnotu v souboru).
- Na začátku souboru se někdy vyskytuje hodnota teploty baterie „0“, přestože z navazujících hodnot je zřejmé, že musí být jiná. Všechny funkce a skripty, které mají význam pro budoucí použití, však berou jako počáteční hodnotu první změnu teploty a zároveň ignorují skokové změny teploty o více než 1°C, takže tuto chybu lze tolerovat.

3.2 Návrh modelu

V této práci bude využita asi nejjednodušší možná verze modelu, zejména proto, že dostupná data by na vytvoření sofistikovanějšího modelu (kde by se dala například řešit teplota v jednotlivých částech baterie) stejně nestačila. Pro vytvoření modelu byly stanoveny následující předpoklady:

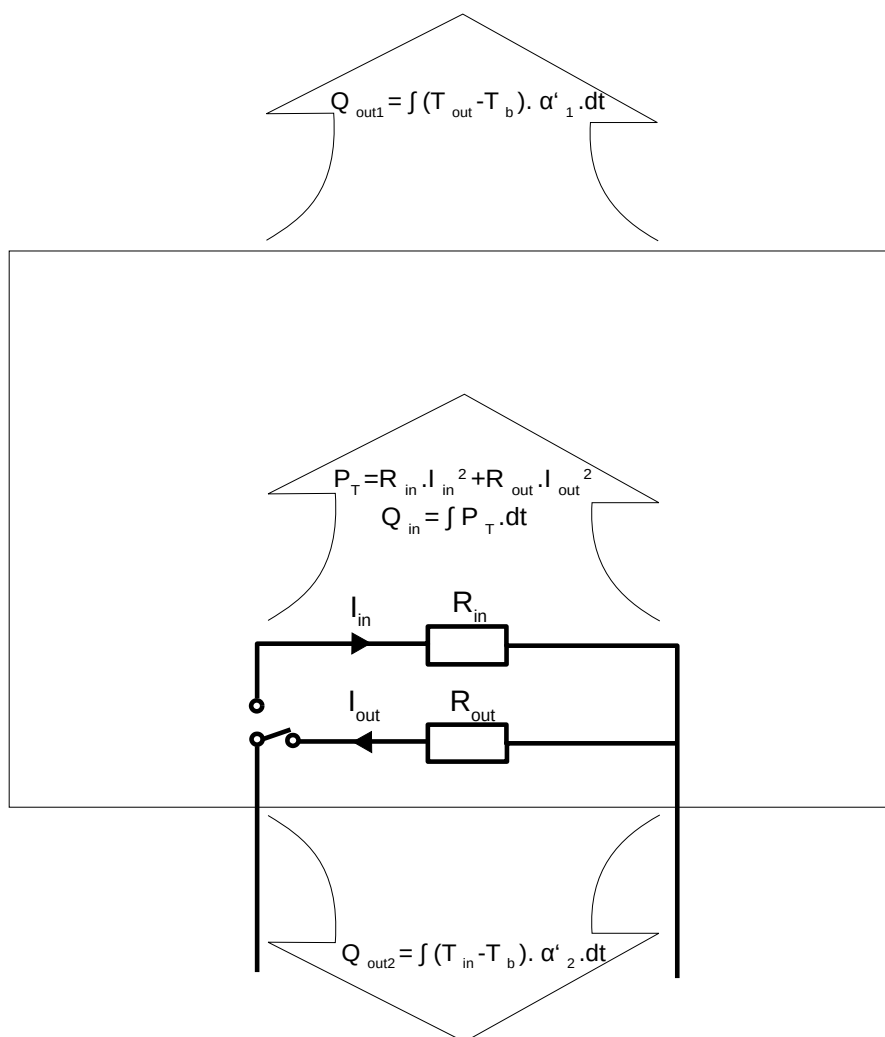
- Rozdíly teplot mezi jednotlivými částmi baterie jsou zanedbatelné
- Proudění vzduchu okolo baterie je časově neproměnné.

Druhý zmíněný předpoklad je ale nutné po získání výsledků znovu posoudit zejména u letních dat. Z příručky k baterii víme, že je bateriový kontejner vybaven ventilátorem, není ale jasné, za jakých podmínek se spouští ani jestli je jeho výkon nějak regulován.[4]

Tepelný výkon dodávaný do baterie by měl odpovídat činnému ztrátovému výkonu, který závisí na kvadrátu proudu a na celkovém vnitřním odporu baterie. Výrobce pro 10s stejnosměrný puls, úroveň nabití (dále jen SOC - State of Charge) 50% a teplotu 25°C uvádí hodnoty vnitřních impedancí 2,6mΩ při nabíjení a 3mΩ při vybíjení.[4]

Přestup tepla do okolí je pak daný koeficienty přestupu tepla α' , které již v tomto případě zahrnují plochu, kterou teplo mezi baterií a okolím přestupuje. Přestup tepla z baterie může směřovat do okolí vozu, dovnitř vozu nebo obojí v určitém poměru. Za účelem určení, kam přestup tepla směřuje, se na úplném začátku pracuje s modelem zahrnujícím jen vliv vnější teploty. Tato varianta je méně náročná na výpočetní čas, než počítat ihned s oběma teplotami a pak případně jednu vyloučit.

Z výše zmíněného pak vychází model vyobrazený na Obr. 2, kde Q_{out1} je teplo přestupující mezi baterií a vnějším vozem, Q_{out2} je teplo přestupující mezi baterií a vnitřkem vozu, P_T je tepelný výkon vnitřních odporů baterie a Q_{in} je elektrické teplo tímto výkonem dodané do baterie.



Obr. 2: Zjednodušený model distribuce tepla

3.3 Varianta bez uvážení vnitřní teploty

3.3.1 Počáteční předpoklady

- Teplota baterie nezávisí na teplotě uvnitř trolejbusu.
- Vnitřní odpor baterie je za všech okolností konstantní.
- V době mezi dvěma po sobě jdoucími záznamy jsou všechny hodnoty konstantní.
- Přesnost měření v kterémkoliv bodě je pro účely výpočtu dostačující.

Za splnění těchto předpokladů pak vychází pro změnu teploty rovnice:

$$dT = \int_0^t k \cdot [(0,0026 \cdot I_{in}^2 + 0,003 \cdot I_{out}^2) + \alpha'_1 (T_{out} - T_b)] \cdot dt \quad (3.1)$$

Hodnoty 0,0026 a 0,003 jsou hodnoty vnitřních odporů. První člen rovnice představuje dodané elektrické teplo, druhý člen přestup tepla mezi baterií a vnějším vozem.

(použití označení „k“ je záměrné, jelikož se nejedná o tepelnou kapacitu jako takovou, ale pouze koeficient jejího vlivu na změnu teploty).

3.3.2 Odhad $k\alpha'_1$

Z původních dat byly nejprve vybrány delší úseky, ve kterých baterií neprochází žádný proud. Toho bylo docíleno jednoduchým přidáním podmínky ($I = 0$) do již zmiňované funkce pro třídění dat. Z toho logicky vyplývá, že dodané elektrické teplo je nulové a z rovnice ho můžeme vyloučit. Pokud v takovém případě použijeme průměry teploty baterie a vnější teploty a budeme s nimi počítat jako s konstantami, původní rovnice se tím omezí na jednoduchou lineární rovnici ve tvaru.

$$dT = \alpha'_1 \cdot k \cdot (T_{out} - T_b) \cdot dt \rightarrow \alpha'_1 \cdot k = \frac{dT}{(T_{out} - T_b) \cdot dt} \quad (3.2)$$

Tím dočasně odpadá potřeba řešit koeficienty k a α'_1 odděleně. Pro sestavení rovnic byly vždy použity úseky mezi dvěma změnami teploty baterie, kde se dá předpokládat, že rozdíl počáteční a konečné teploty určíme nejpřesněji.

Jelikož tímto způsobem vzniklo více rovnic s různými výsledky, byl pro další postup použit jejich průměr. Z této rovnice byl následně vyjádřen koeficient přestupu tepla α'_1 jako $\alpha k/k$ a v dalším kroku tedy za předpokladu dostatečné přesnosti výsledku stačilo zjistit hodnotu k .

3.3.3 Určení vlivu tepelné kapacity k

Pro nalezení vhodné hodnoty k byla využita data z prvních 9 souborů (všechny pořízeny v zimě). Předpokládalo se, že pro ostatní data pořízená v zimě se výsledky nebudou výrazně lišit a data pořízená v létě mohla být zavádějící kvůli možnému použití ventilátoru.

Z každého souboru bylo vybráno 20 náhodných bodů, pro které byla vypočtena nejlepší možná hodnota k podle vzorce:

$$k = \frac{T_b(x) - T_b(1) + \alpha'_1 \cdot k \cdot \left(\int_0^x T_b \cdot dt - \int_0^x T_{out} \cdot dt \right)}{0,0026 \cdot \int_0^x I_{in}^2 \cdot dt + 0,003 \cdot \int_0^x I_{out}^2 \cdot dt} \quad (3.3)$$

Z takto získaných hodnot byl následně udělán průměr. Z výpočtu byly po zvážení výsledků vyloučeny hodnoty pro soubory 2 a 5, které se zcela zásadně odlišovaly od ostatních a pravděpodobně by výslednou hodnotu posouvaly zbytečně daleko od obecně nejlepší.

V zájmu lepší přehlednosti (kvůli délce názvů nebo použití přímých hodnot) práce budou v této i následujících ukázkách funkcí a skriptů proměnné přepsány podle značení v ostatních částech práce. Originální úplné verze funkcí a skriptů lze nalézt v přílohách (u tištěné verze na CD).

Hodnota dt je v tomto případě časový odstup mezi 2 záznamy (0,2s). Veškeré teploty a proudy jsou uloženy ve vektorech a jde o okamžité hodnoty.

```
for x=1:20
    bod=randi([100000 length(I_in)],1); %vybere nahodny bod z daneho
souboru
    k=(T_b(bod)-T_b(1) + alpha'*k*dt*(sum(T_b(1:bod))-
sum(T_out(1:bod))))/(dt*(R_in*sum(I_in(1:bod).^2)+R_out*sum(I_out(1:bod).^2)));
    %vypocet nejlepe odpovidajici hodnoty k
    CC(20*(z-1)+x)=k; %uklada vsechny nalezene hodnoty k
end
...
fprintf('prumerna hodnota k=%f \n',mean(CC));
```

3.3.4 Upřesnění hodnoty k

Vzhledem k výrazným rozdílům ideální hodnoty k mezi jednotlivými soubory, ale i jen jednotlivými body v nich bylo konstatováno, že hodnotu zjištěnou jejich průměrem nelze považovat za příliš přesnou. Byla proto využita pouze k nastavení rozsahů v další fázi.

V zájmu nalezení přesnější hodnoty k byl okolo hodnoty z předchozího kroku stanoven určitý rozsah a určitý počet hodnot k z něj byl testován. Z testovaných souborů byly nejprve vybrány všechny úseky mezi dvěma po sobě jdoucími stejnými změnami teploty, tj. mezi dvěma poklesy nebo dvěma nárůsty. Důvodem pro toto omezení byla nemožnost odhadnout průběh teploty mezi opačnými změnami. Změna změřené teploty o 1°C by u nich pravděpodobně znamenala změnu mnohem menší.

Pro tyto vybrané úseky byla následně vypočtena průměrná vnější teplota, součty kvadrátů proudů a délka úseku. Na jejich základě se pak pro každou variantu k a pro každý úsek

vypočetla teoretická změna teploty, porovnávala se s naměřenou a na základě součtu všech odchylek pro stejné k byla vybrána jeho nejvhodnější hodnota.

Níže popsáný úryvek skriptu pracuje s vektory obsahujícími průměrné hodnoty teplot a kvadrátů proudů, proto jsou proudy uvedeny jako I_{index} , nikoliv I_{index}^2 , jak by odpovídalo syntaxi Matlabu, pokud by se umocňoval až ve vzorci. Hodnota dt je v tomto případě délka celého zkoumaného úseku a z je pozice ve vektoru. V originálním skriptu jsou použity 2 skupiny vektorů: pro kladné změny teploty a pro záporné změny teploty.

```
for k = 0:1e-6:1;
    celkovachyba=0;
    for z = 1:length(T_out) %pro změnu teploty směrem nahoru
        chyba = k*(R_in*I_in^2(z)+R_out*I_out^2(z)+(alpha_prime*k/k)*dt(z)*(T_out(z)-T_b(z)))-1;
        celkovachyba=celkovachyba+chyba;
    end
    for z = 1:length(T_out) %pro změnu teploty směrem dolů
        chyba = k*(R_in*I_in^2(z)+R_out*I_out^2(z)+(alpha_prime*k/k)*dt(z)*(T_out(z)-T_b(z)))+1;
        celkovachyba=celkovachyba+chyba;
    end
    if abs(celkovachyba)<minchyba
        nejck=k;
        minchyba=abs(celkovachyba)
    end
end
```

3.3.5 Upřesnění k a α'_1

Jelikož tento postup stále dosahoval poměrně velké chyby, bylo rozhodnuto za pomoci dosud používaného testování různých variant určovat oba parametry. Tedy rozšířit skript o procházení několika variant α'_1 .

Kromě rozšíření byl skript navíc upraven tak, aby v každém bodě s výjimkou počátečního počítal s teplotou baterie vypočtenou pro bod předchozí (dosud počítal s teplotou změřenou). Také rozdíl vypočtené a naměřené teploty se nyní vyhodnocoval v každém bodě, přičemž se absolutní hodnoty chyb za celý soubor sčítaly.

Tato úprava samozřejmě znamenala zpomalení celého skriptu. Jedním z hlavních problémů byl fakt, že časové odstupy mezi jednotlivými záznamy v souboru nebyly vždy stejné a musely by se tedy pro každý bod zvlášť dopočítávat. Tomuto kroku se ale dalo vyhnout vytvořením alternativních souborů pomocí interpolace původních. Interpolace umožnila použít nejmenší dostupný odstup mezi záznamy (0,2s) a místa, kde pro takový odstup

nejsou hodnoty dostupné, je dosadit na základě hodnot okolních. V současnosti jsou pro tyto soubory upraveny i skripty použité v předchozích krocích.

V uvedené funkci se počítá s vektory okamžitých hodnot pro každý bod interpolovaných souborů, dt je časový odstup mezi záznamy (0,2s) a m je pozice ve vektoru. Expectt je vektor vypočtené teploty.

```

...
for k=1:9 %Pro zpracovani prvnych 9 souboru najednou
    lastrozdil=100;
    rozdil=100;
    load(filename);
lastrozdil=inf; %pro hledani k a  $\alpha'$ -uklada nejnizsi dosud dosazeny
soucet rozdilu namerene a vypoctene teploty

    for k = 5e-06:5e-07:1e-04 %pro hledani k a  $\alpha'$ 
for  $\alpha' = 5e-03:50e-03:1$  %pro hledani k a alfa

        rozdil=0; %pro hledani k a  $\alpha'$ 
        rozdilabs=0; %pro hledani k a  $\alpha'$ 

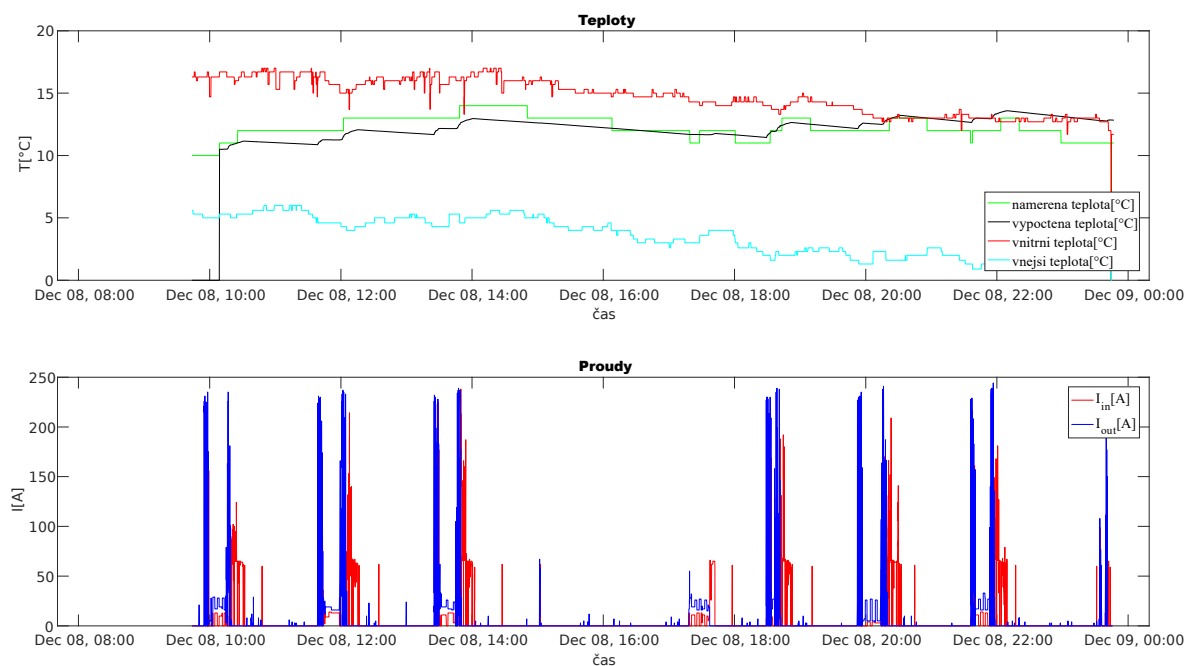
            expectt(1:100)=Tb(100);
            for m = 101:length(Tb)
                expectt(m) = expectt(m-1) + (Iin(m-1)^2*Rin + Iout(m-1)^2*Rout
- ((expectt(m-1)-Tout(m-1))* $\alpha'$ ))*k*dt;
            end
            rozdilabs=rozdilabs+abs(expectt(m)-Tb(m));
            rozdil=rozdil+(expectt(m)-Tb(m));

        if rozdilabs<lastrozdil
            lastrozdil=rozdilabs;
            cmin=k; %zatím nejlepší hodnota k
            amin= $\alpha'$ ; %zatím nejlepší hodnota  $\alpha'$ 
        end
    end
...

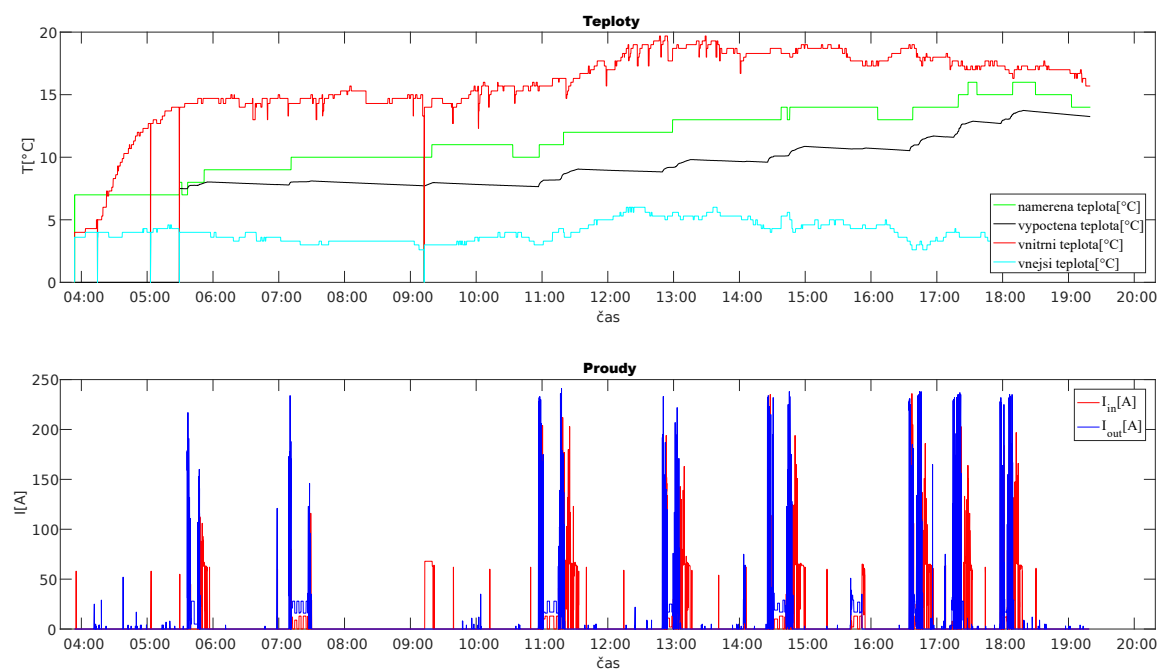
```

3.3.6 Zhodnocení výsledků

Ideální hodnoty k a α byly vyhodnoceny pro každý soubor zvlášť a jejich zprůměrováním byly dosaženy první alespoň zdánlivě použitelné výsledky $k=5,366 \cdot 10^{-5}$ a $\alpha' = 0,24944$



Obr. 3: Jeden z nejlepších výsledků bez uvážení vlivu vnitřní teploty (soubor 1 - 8.12.2017 09:43:49 - 8.12.2017 23:51:20)



Obr. 4: Nejhorší výsledek bez uvážení vlivu vnitřní teploty (soubor 4 - 15.12.2017 03:53:46 - 15.12.2017 19:24:07)

Poznámka: Všechny ostatní grafy i k ostatním metodám lze nalézt v přílohách (pro tištěnou verzi na přiloženém CD)

Pro některé soubory (např. Obr. 3) by se získaný průběh teploty dal považovat za poměrně přesný, u jiných (Obr. 4) ale rozdíl mezi naměřenou a vypočtenou hodnotou roste až k cca 4°C za relativně (vzhledem k rychlosti změny teploty) krátký časový úsek.

Při bližším pohledu je zřejmé, že vypočtená teplota klesá výrazně rychleji oproti naměřené, pokud je teplota uvnitř vozu výrazně vyšší než teplota baterie a naopak v místech, kde jsou teploty téměř stejné, klesá příliš pomalu. Závěrem tedy je, že teplota baterie je ovlivňována jak vnější teplotou, tak i teplotou uvnitř vozu a je tedy třeba tomu postup přizpůsobit.

3.4 Varianta s uvážením vnitřní i vnější teploty

Počáteční předpoklady:

- Teplota baterie závisí jak na venkovní teplotě, tak na teplotě uvnitř trolejbusu.
- Vnitřní odpor baterie je za všech okolností konstantní.
- V době mezi dvěma po sobě jdoucími záznamy jsou všechny hodnoty konstantní.
- Přesnost měření v kterémkoliv bodě je pro účely výpočtu dostačující.
- V této variantě s ohledem na předešlá zjištění došlo k rozšíření původní rovnice do tvaru:

$$dT = \int_0^t k \cdot [(0,0026 \cdot I_{in}^2 + 0,03 \cdot I_{out}^2) + \alpha'_1 (T_{out} - T_b) + \alpha'_2 (T_{out} - T_b)] \cdot dt \quad (3.4)$$

3.4.1 Počáteční odhad parametrů

Stejně jako u předchozí varianty byly i zde pro počáteční odhad parametrů využity úseky, ve kterých je proud baterií nulový. Rozšíření o parametr α'_2 ovšem znamenalo, že již nestačí pro začátek najít jen jeden parametr, bylo potřeba zjistit jak $k\alpha'_1$, tak i $k\alpha'_2$.

Základem pro výpočet byl vzorec

$$dT = \int_0^t k \cdot [\alpha'_1 (T_{out} - T_b) + \alpha'_2 (T_{out} - T_b)] \cdot dt \quad (3.5)$$

resp. $dT = dt \cdot [k \cdot \alpha'_1 (T_{out} - T_b) + k \cdot \alpha'_2 (T_{out} - T_b)]$

Kde první člen představuje přenos tepla do vnějšího prostředí a druhý člen přenos tepla do vnitřku trolejbusu. Vzorec platí pouze při nulových proudech.

Druhá uvedená varianta je určena pro výpočet s průměrnými hodnotami za celý časový úsek, který je použit v této práci. Pro sestavení rovnic byly využity úseky vždy mezi

dvěma po sobě jdoucími změnami teploty baterie. Dosazením změny teploty baterie a průměrných hodnot všech teplot bylo získáno celkem 5 rovnic o 2 neznámých α'_1 a α'_2 . Tyto rovnice byly řešeny ve všech sestavitelných dvojicích (každá s každou). V praxi skript pro tento výpočet vypadal následovně (pracuje se s vektory průměrných hodnot za celý úsek a dt je délka úseku):

```
a=[-1;-1]; %vektor pravých stran (změna teploty je vždy -1)
d=1;
for y = 1:(length(dt)-1) %počítá výsledky všech možný dvojic rovnic
    for yy = (y+1):length(dt)
        b=[ (Tout(y)-Tb(y))*dt(y), (Tin(y)-Tb(y))*dt(y); (Tout(yy)-
Tb(yy))*dt(yy), (Tin(yy)-Tout(yy))*dt(yy)]; %matice levých stran
        c=b\a; %výpočet soustavy
        alpha1C(d)=c(1); %výsledky  $\alpha'_1$ 
        alpha2C(d)=c(2); %výsledky  $\alpha'_2$ 
        d=d+1; %posun na další pozici vektoru výsledků
    end
end
```

Tento postup ve výsledku znamenal celkem 10 různých hodnot $\alpha'_{1,a}$ a α'_2 . Původním záměrem bylo všechny takto dosažené výsledky zprůměrovat, od toho ale bylo nakonec upuštěno s ohledem na velmi výrazné rozdíly mezi jednotlivými výsledky. Místo toho byla z výsledků pro každý parametr vybrána jeho nejvyšší hodnota a ta následně použita k nastavení rozsahu pro již dříve uvedenou metodu testování různých variant parametrů.

3.4.2 Upřesnění α'_1 a α'_2

Podobně jako u první varianty byla srovnávána teoretická a naměřená změna teploty pro několik hodnot α'_1 a α'_2 z rozsahu od 0 po maximum vypočtené z rovnic, tentokrát ale pouze pro úseky bez proudu. Také se zde nepočítala teplota a chyba v každém bodě, ale pouze teoretická změna teploty mezi dvěma body změny skutečné. Výpočet teoretické změny teploty za celý úsek byl pochopitelně oproti výpočtu teploty v každém bodě méně přesný, ale také podstatně rychlejší, což umožnilo projít velký rozsah hodnot. Vypočtená změna teploty se pak se skutečnou změnou porovnala a jednotlivé chyby byly sečteny. Ve skriptu se pracovalo s průměrnými hodnotami teplot mezi jednotlivými změnami teploty baterie.

V této chvíli se ve skriptech pro určení nejhodnější varianty začíná počítat s kvadrátem chyby (dosud se používala absolutní hodnota), což by mělo lépe zabránit krátkým ale výrazným odchylnám. Kvadrát chyby se již bude používat i po zbytek práce. *Alpha1C* a

α_2C jsou vektory výsledků rovnic z předchozí kapitoly (jde o přímé pokračování skriptu výše). Stále se zde počítá s vektory průměrných hodnot pro každý úsek.

```

chybamin=inf;
for ka'1 = 0:0.0000001:max(alpha1C)
    for ka'2 = 0:0.0000001:max(alpha2C)
        celkovachyba=0;
        for y = 1:length(dt)
            chyba=(ka'1*(T_out(y)-T_b(y))*dt(y)+ka'2*(T_in(y)-T_b(y))*dt(y)+1)^2;
            celkovachyba=celkovachyba+chyba;
        end
        if celkovachyba<chybamin
            chybamin=celkovachyba;
            bestAC1=AC1;
            bestAC2=AC2;
        end
    end
end
end

```

Metoda testování variant měla být použita i nadále, pro určení všech 3 parametrů. To samozřejmě vyžadovalo nejprve zvolit vhodné nastavení rozsahů a pro to byla potřeba zjistit alespoň přibližnou hodnotu k .

Zde byl postup v podstatě stejný jako pro upřesnění k u první varianty (kapitola 3.3.4). Je i řešen téměř stejným skriptem, pouze se zde rozšířil vzorec pro výpočet teoretické změny teploty o vliv teploty vnitřní a místo absolutních hodnot chyb se sčítají jejich kvadráty.

Tedy pro rekapitulaci: pro stále zatím 9 zkoumaných souborů byly nejprve vybrány všechny úseky mezi dvěma po sobě jdoucími stejnými změnami teploty, tj. mezi dvěma poklesy nebo dvěma nárůsty.

Pro tyto vybrané úseky byla následně vypočtena průměrná vnější i vnitřní teplota, součty kvadrátů proudů a délka úseku. Na jejich základě se pak pro každou variantu k a pro každý úsek vypočetla teoretická změna teploty, porovnála se s naměřenou a na základě součtu všech odchylek pro stejné k byla vybrána jeho nejvhodnější hodnota. Koeficienty α' se pak snadno získají dělením $k\alpha'$ získaným k .

Získané parametry byly opět použity jako výchozí pro nastavení rozsahů. Oproti první variantě došlo kromě přidání α_2 i k několika úpravám výpočtů.

Upraven byl jak výpočet předpokládané teploty, tak dosažené chyby. Původně byla jako výchozí hodnota pro výpočet předpokládané teploty brána první hodnota teploty baterie v souboru, nyní výpočet začínal až od první změny teploty. Také dosažená chyba se již nepočítala v každém bodě, ale pouze v bodech, kde se naměřená teplota mění. Dalo by se namítat, že tento výpočet chyby byl použit již v kapitole 3.3.4 i v předchozím kroku, to však bylo pouze proto, že pro jiné body nebyla žádná vypočtená teplota, kterou by bylo možno posuzovat.

V tomto případě bylo důvodem pro obě tyto změny měření teploty baterie s přesností na celé stupně, což v praxi znamenalo, že reálná teplota na začátku souboru mohla být až o +/- 0,5°C jiná než naměřená a obdobně chyba 0,5°C mohla ve skutečnosti znamenat hodnotu naprosto přesnou. Na druhou stranu v bodech změny teploty se dalo očekávat, že reálná teplota bude přesně průměrem teploty předchozí a následující a i kdyby bylo zaokrouhlení teploty nastavené jinak, pořád se dal přesně určit teplotní rozdíl mezi dvěma změnami.

Také se zde poprvé využilo proměnné ohraničení rozsahů s automatickým přenastavováním. V ukázce je verze skriptu již rozšířená o letní soubory

```
for k=cmin:0.000001:cmax
    for  $\alpha_1$ =a1min:0.01:a1max
        for  $\alpha_2$ =a2min:0.01:a2max
            celkovachyba=0;
            filename = 'baterieInterpolovana01';
            for x = 1:21
                load(filename);
                a=1;
                b=1;
                expectt=zeros(length(Tb):1); %alokace pro vektor vypočtené teploty

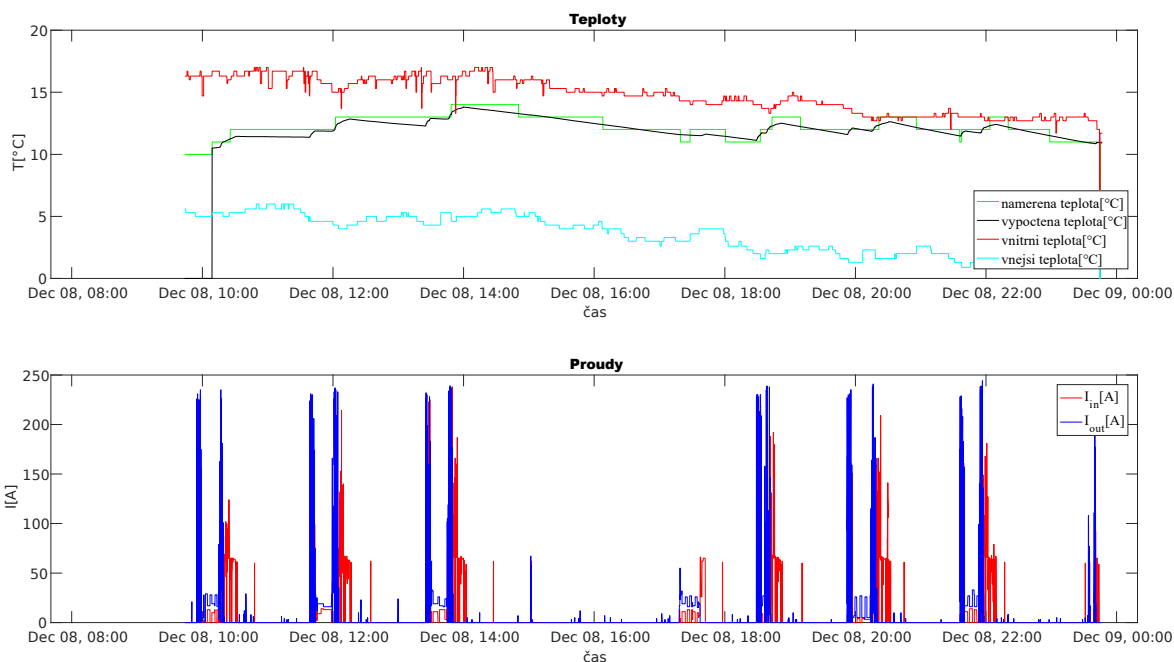
                for y=2:length(Tb)
                    if abs(Tb(y-1)-Tb(y))==1 %vyhledá body, kde se mění teplota a
                        uloží jejich pozice
                            zlom(a)=y;
                            a=a+1;
                        end
                    end
                    expectt(zlom(1)-1)=mean(Tb((zlom(1)-1):zlom(1))); %počáteční hodnota
                    pro výpočet
                        for m = zlom(1):1:length(Tb)
                            expectt(m) = expectt(m-1)+(Iin(m-1)^2*Rin + Iout(m-1)^2*Rout -
                                ((expectt(m-1)-Tout(m-1))* $\alpha_1$  - ((expectt(m-1)-Tin(m-1))* $\alpha_2$ ))*k*0.2;
                        end
                    for y=2:length(zlom)

                        chyba=abs(mean(Tb((zlom(y)-1):zlom(y)))-expectt(zlom(y)));
                        celkovachyba=celkovachyba+chyba^2;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
```

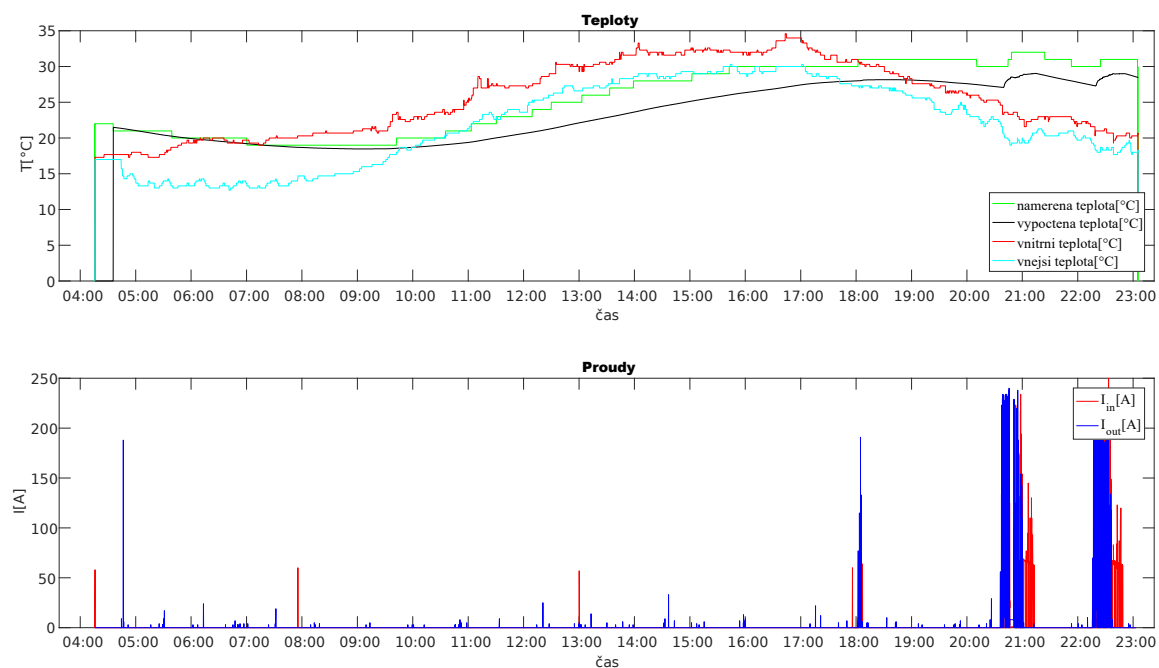
end

3.4.3 Zhodnocení výsledků

Po několika úpravách rozsahu byl nakonec získán výsledek $C = 6,8 \cdot 10^{-5}$ $\alpha'_1 = 0,49$ a $\alpha'_2 = 0,5$



Obr. 5: Jeden z nejlepších výsledků (soubor 1 8.12.2017 09:43:49 - 8.12.2017 23:51:20)



Obr. 6: Nejhorší výsledek (soubor 21 - 20.9.2018 04:15:45 - 20.9.2018 23:12:51)

Po novém vykreslení grafů s těmito hodnotami bylo zřejmé výrazné zlepšení. U souborů se zimními daty (např. Obr. 5) byl průběh téměř přesný, při aplikaci na většinu letních dat (např. Obr. 6) byl ale pořád rozdíl poměrně výrazný. To se téměř nezměnilo ani rozšířením skriptu o vyhodnocování všech souborů (tedy včetně těch pořízených v létě).

Sice se od začátku počítalo s možností, že u letních dat by reálně mohlo docházet k rychlejšímu chladnutí baterie vlivem ventilátoru, vypočtená teplota se však paradoxně držela pod naměřenou, což rozhodně vypadalo na jiný důvod. První teorií byla tepelná závislost odporů v baterii, po konzultaci s vedoucím bakalářské práce jsme pak přišli s druhou teorií a to časovým posunem mezi reálnou změnou venkovní, popřípadě vnitřní, teploty a okamžikem, kdy ji zaznamená tachograf. Tato teorie byla založená zejména na faktu, že u některých souborů se zdá, že odchylování se vypočtené teploty od naměřené začíná přibližně ve chvíli, kdy začíná výrazně růst teplota uvnitř trolejbusu.

Ideální by samozřejmě bylo využít obě teorie najednou, nicméně tak jak skript v současné době fungoval, by to bylo časově extrémně náročné. Po zvážení byl z toho důvodu pro další testování vybrán pouze časový posuv teploty jako pravděpodobně významnější. To ovšem vyžadovalo zásadní přepracování toho, jak skript dosud fungoval.

3.4.4 Přepracování a rozšíření skriptu

Z hlediska vyhodnocování chyb a následného určení výsledků byly dosud používány 2 druhy skriptů. U první varianty se výsledná chyba vyhodnocovala pro každý soubor zvlášť. Výhodou byla jednoduchost realizace a rychlost, nevýhodou obtížnost vyhodnocení dosažených výsledků.

Druhá varianta sčítala pro každou zkoumanou kombinaci parametrů chyby za všechny soubory. Výhodou byl jednoznačný výsledek, nevýhodou především nově vzniklá nutnost časového posuvu vnější teploty a teploty uvnitř trolejbusu, jejíž realizace by zde byla přinejmenším obtížná. Navíc mnohokrát opakované načítání stále stejných souborů skript značně zpomalovalo samo o sobě.

Bylo tedy potřeba vytvořit skript, který projde všechny varianty v následujícím pořadí od nejméně často měněné: Soubor, posuny teploty, hodnoty parametrů. Toto pořadí bylo

nutné, aby k časovému posunu teploty nedocházelo zbytečně často a skript se tím nezpomaloval.

Tento postup logicky vylučoval přímé sčítání chyb pro všechny soubory dohromady a zároveň pro každou variantu zvlášť. Aby se tedy výsledky daly vyhodnotit, bylo potřeba vytvořit si dvě pomocné matice. V jedné byly uloženy testované kombinace parametrů, ve druhé pak dosažené součty kvadrátů chyb zvlášť pro každý soubor (řádek) a kombinaci (sloupec). Teprve po zpracování všech variant pro všechny soubory se pak chyby pro každou variantu sečetli, našlo se jejich minimum a jemu odpovídající hodnoty parametrů.

Aby skript nepracoval příliš dlouho, používalo se nejvýše 10, nejčastěji pak 5 variant pro každý parametr, což vedlo na opakované přenastavování rozsahu, jelikož téměř vždy byl alespoň jeden z výsledků na okraji rozsahu. Z počátku byly vytvořeny 2 verze, jak tuto činnost zautomatizovat.

První verze byla určená pro domácí testování, počet možností pro každé parametru byl 5 a rozsah byl posouván tak, aby se poslední hodnota určená jako nejlepší nacházela uprostřed. Tato verze byla poměrně rychlá, její nevýhodou však byla tendence „uvíznout“ v lokálním minimu. Ani rozšíření na 10 možností pro každý parametr by pravděpodobně tento nedostatek nevyřešilo.

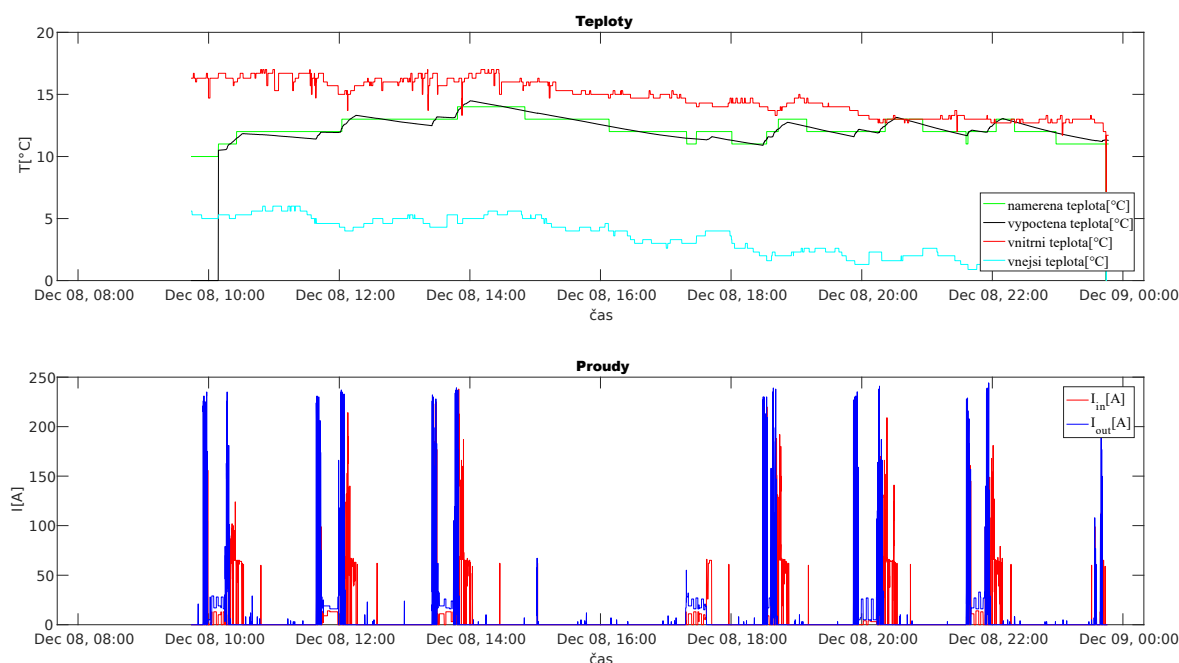
Pro druhou verzi, která měla být spuštěna přes víkend ve škole, byl proto na začátek skriptu umístěn předběžný odhad. Ten spočíval v prozkoumání relativně širokého rozsahu k (50 hodnot), α_1 a α_2 (80 hodnot), v tomto případě bez uvážení časového posunu teploty. Předpokládalo se, že posun teploty bude mít na výsledek poměrně malý vliv a v této fázi by skript zbytečně zpomaloval. Z výsledku tohoto odhadu byl pro další postup stanoven rozsah 9 hodnot okolo dosažených výsledků.

V navazujícím cyklu se pak rozsah po zjištění nejvhodnějších parametrů nejen případně posouval, ale také zmenšoval, resp. byl zachován počet kroků, ale rozdíl mezi minimem a maximem se zmenšil na 2/3 původního. Tím by při dostatečném počtu běhů mělo být dosaženo vyšší přesnosti konečných výsledků.

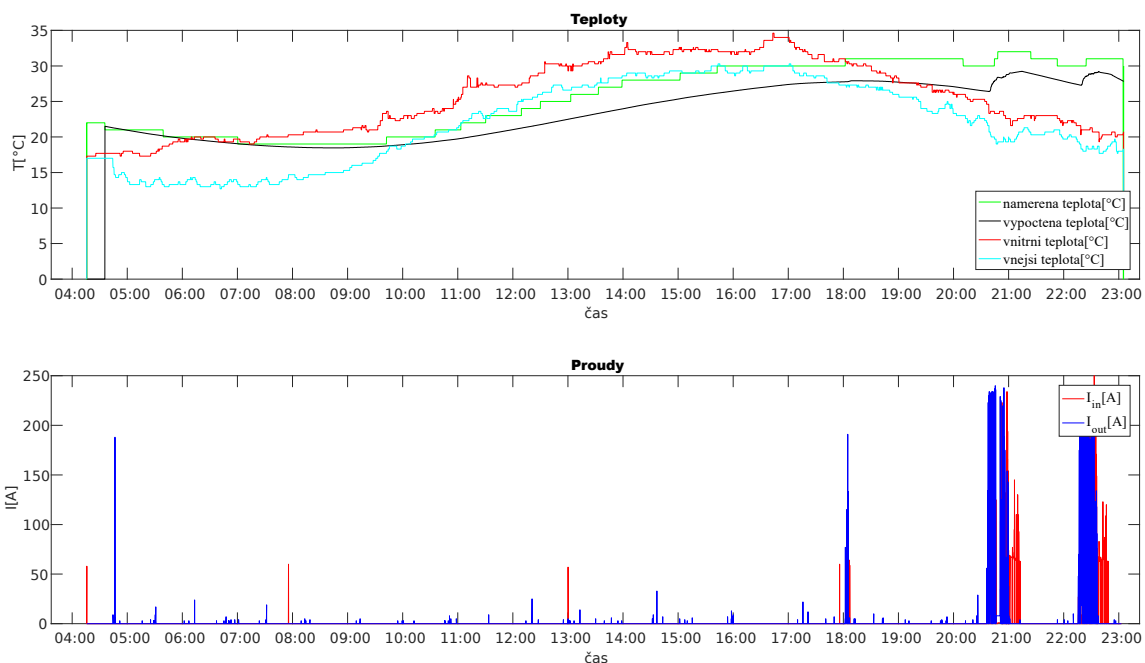
Nakonec byly pro účely tohoto skriptu znovu upraveny zdrojové soubory, u kterých byl zvětšen časový interval mezi záznamy z 0,2 na 1s (prodloužením doby platnosti teplot a zprůměrováním kvadrátů proudů), což skript výrazně zrychlilo a snížení jeho přesnosti by mělo být zanedbatelné. Také v těchto souborech již byly proudy předběžně umocněny na druhou, což by také mělo značně snížit počet výpočetních operací.

3.4.5 Výsledky

S pomocí tohoto skriptu bylo dosaženo výsledků $k = 8.8187 \cdot 10^{-5}$, $\alpha'_1 = 0.45375$, $\alpha'_2 = 0.393125$, časový posun vnitřní teploty 75s a vnější teploty = 2461s



Obr. 7: Jeden z nejlepších výsledků (soubor 1 8.12.2017 09:43:49 - 8.12.2017 23:51:20)



Obr. 8: Nejhorší výsledek (soubor 21 - 20.9.2018 04:15:45 - 20.9.2018 23:12:51)

Ačkoliv jisté zlepšení u letních dat tu viditelné je, nedá se říci, že by bylo dosaženo zcela přesného výsledku. Za účelem dalšího zpřesnění měly být přidány další parametry, což ale znamenalo najít časově úspornější metodu.

3.5 Metoda nejmenších čtverců

3.5.1 Důvody použití

Jak již bylo uvedeno dříve, další uvažovanou možností, která by mohla vysvětlovat dosažené odchylky, byla závislost vnitřních odporů na teplotě. Odpory mohly být závislé i na stavu nabití. Ovšem pokud bychom tyto závislosti chtěli zjistit dosud používanou metodou, je pravděpodobné, že by skript běžel minimálně několik týdnů a další rozšiřování intervalu mezi zkoumanými záznamy by v potřebném měřítku vedlo na podstatné snížení přesnosti. Původní metoda tak byla ponechána pouze pro časové posuny teplot, které by se obtížně zapracovávaly do rovnic, a ostatní parametry řešeny pomocí metody nejmenších čtverců.

3.5.2 Odvození

Základem pro výpočet byla rovnice

$$a \cdot k + b \cdot \alpha'_1 \cdot k + c \cdot \alpha'_2 \cdot k = \frac{dT}{dt} \quad (3.6)$$

Kde pro zkoumaný časový úsek platí:

- a je průměr tepelného výkonu
- b je průměrný rozdíl mezi vnější teplotou a teplotou baterie
- c je průměrný rozdíl mezi vnitřní teplotou a teplotou baterie
- dT je dosažená změna teploty baterie.
- dt je délka zkoumaného úseku.

Metoda nejmenších čtverců spočívá v nalezení nejmenšího možného součtu kvadrátů rozdílů mezi body zkoumaného průběhu a průběhu, který dokážeme popsat lineární rovnicí.

V tomto případě tedy hledáme minimum funkce

$$S = \sum_{i=1}^n [dt_i \cdot (a_i \cdot k + b_i \cdot \alpha'_1 \cdot k + c_i \cdot \alpha'_2 \cdot k) - dT_i]^2 \quad (3.7)[5]$$

K této rovnici je dále potřeba zjistit její parciální derivace (v příkladu derivace podle k)

$$\frac{dS}{dk} = \sum_{i=1}^n [2 \cdot a_i \cdot (dt_i \cdot (a_i \cdot k + b_i \cdot \alpha'_1 \cdot k + c_i \cdot \alpha'_2 \cdot k) - dT_i)] \quad (3.8)[5]$$

Poznámka: Pro účely výpočtu se $\alpha' \cdot k$ berou jako jedna hodnota, proto se podle k derivují jako konstanty.

Pro nalezení extrému funkce musíme derivaci položit rovnu nule. Pro zjednodušení zápisu můžeme také výslednou rovnici vydělit dvěma. Dále převedeme členy bez neznámých na pravou stranu a získáváme rovnici:

$$\sum_{i=1}^n (a_i^2 \cdot k + a_i \cdot b_i \cdot \alpha'_1 \cdot k + a_i \cdot c_i \cdot \alpha'_2 \cdot k) = \sum_{i=1}^n \frac{dT_i \cdot a_i}{dt_i} \quad (3.9)$$

Dopočtením ostatních parciálních derivací se pak dostáváme k maticovému zápisu:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n a_i^2 & \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i & \sum_{i=1}^n a_i \cdot c_i \\ \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i & \sum_{i=1}^n b_i^2 & \sum_{i=1}^n b_i \cdot c_i \\ \sum_{i=1}^n a_i \cdot c_i & \sum_{i=1}^n b_i \cdot c_i & \sum_{i=1}^n c_i^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k \\ \alpha'_1 \cdot k \\ \alpha'_2 \cdot k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{dT_i \cdot a_i}{dt_i} \\ \sum_{i=1}^n \frac{dT_i \cdot b_i}{dt_i} \\ \sum_{i=1}^n \frac{dT_i \cdot c_i}{dt_i} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Bližším pohledem na vznik jednotlivých rovnic lze pak odvodit zápis pro libovolný počet proměnných za předpokladu, že je rovnice lineární.

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 & \sum_{i=1}^n x_{1i} \cdot x_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{1i} \cdot x_{ni} \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} \cdot x_{2i} & \sum_{i=1}^n x_{2i}^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_{2i} \cdot x_{ni} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} \cdot x_{ni} & \sum_{i=1}^n x_{2i} \cdot x_{ni} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{ni}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{dT_i \cdot x_{1i}}{dt_i} \\ \sum_{i=1}^n \frac{dT_i \cdot x_{2i}}{dt_i} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n \frac{dT_i \cdot x_{ni}}{dt_i} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.5.3 Parametry skriptu

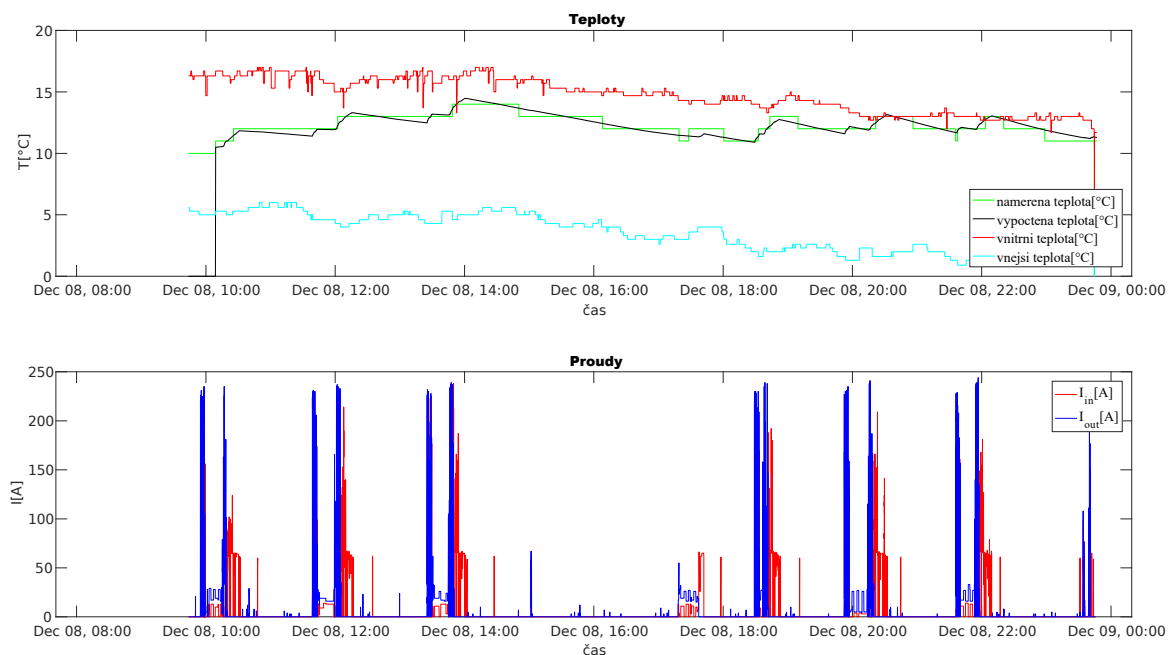
Při prvním použití se vycházelo z hodnot vždy mezi 2 po sobě následujícími změnami teploty.

Po zhodnocení dosažených výsledků byly do výpočtu přidány rovnice pro delší časové úseky (10 změn teploty) s dvojnásobnou vahou a také přiřazena vyšší váha úsekům s velkým rozdílem mezi teplotou baterie a vnitřní teplotou, s vysokou teplotou baterie a především s vyššími hodnotami proudu.

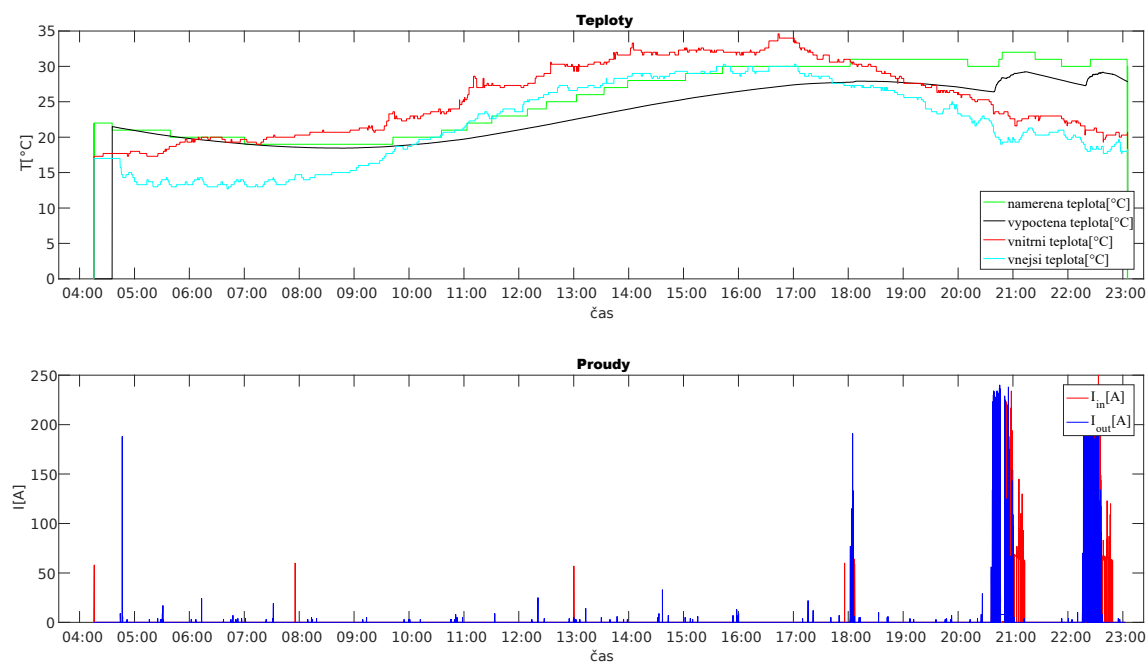
3.5.4 Výsledky

Z metody nejmenších čtverců vychází jako ideální hodnoty

- $k=88 \cdot 10^{-5}$
- $\alpha'_1=0.415737$
- $\alpha'_2=0.324404$
- změna nabíjecího odporu $-8.728598 \cdot 10^{-5} \Omega/^\circ\text{C}$ a $+1.216008 \cdot 10^{-6} \Omega/\%_{\text{SOC}}$
- změna vybíjecího odporu $+4.262897 \cdot 10^{-5} \Omega/^\circ\text{C}$ a $-2.030819 \cdot 10^{-6} \Omega/\%_{\text{SOC}}$
- časový posun vnější teploty 2520s a vnitřní teploty 0s.



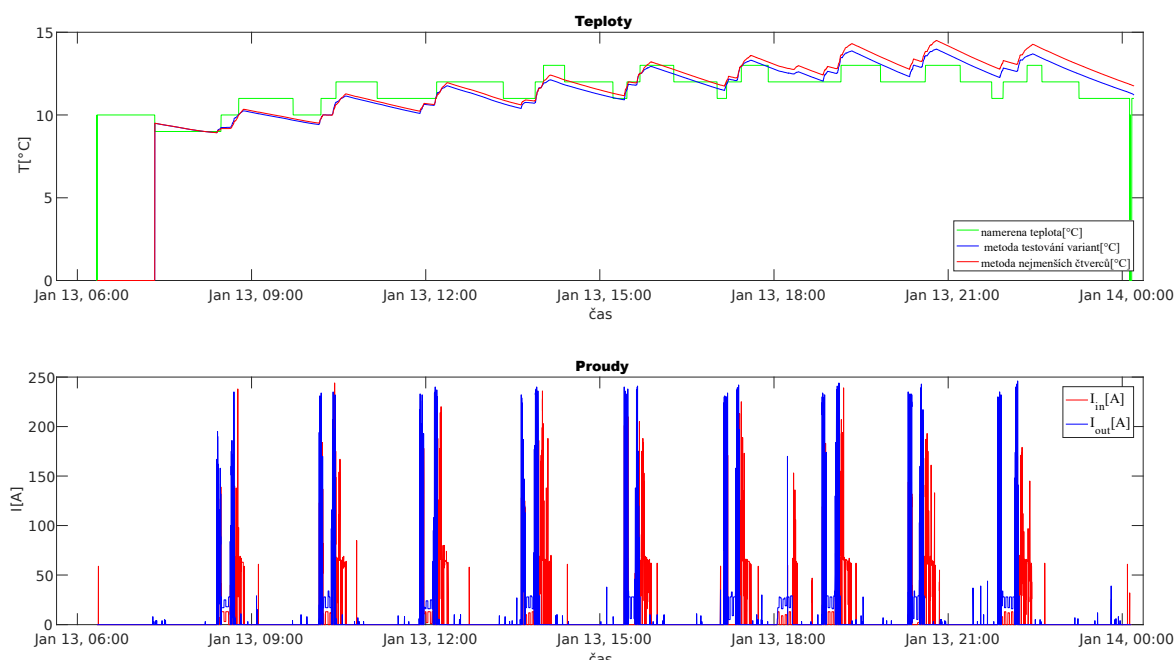
Obr. 9: Jeden z nejlepších výsledků (soubor 1 8.12.2017 09:43:49 - 9.12.2017 23:51:20)



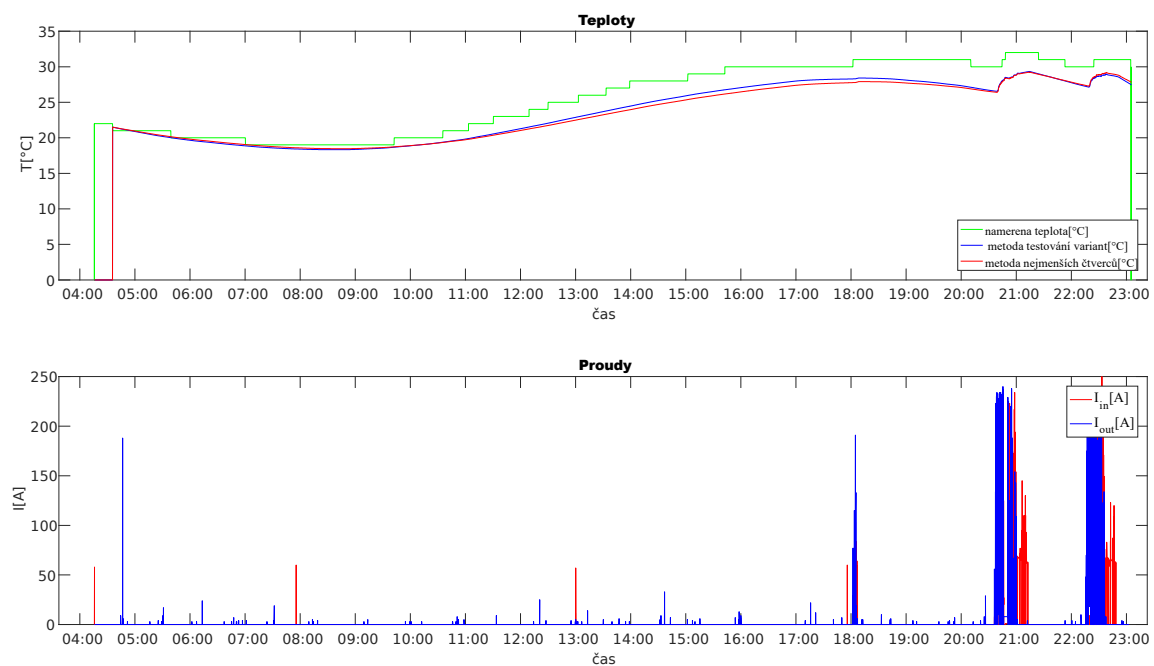
Obr. 10: Nejhorší výsledek (soubor 21 - 20.9.2018 04:15:45 - 20.9.2018 23:12:51)

Tady je třeba říci, že ani rozšíření počtu parametrů ke zlepšení výsledku nevedlo. Celkový součet kvadrátů chyb za všechny soubory je dokonce mírně horší, což je ale spíše problém metody.

3.6 Porovnání výsledků obou metod

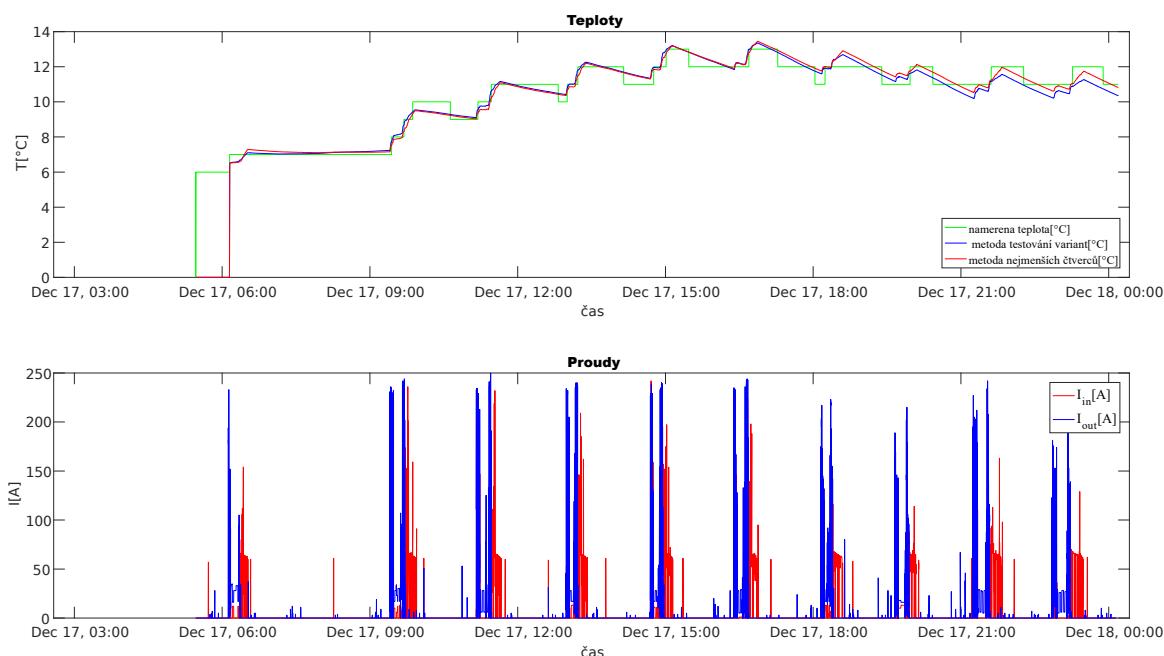


Obr. 11: Příklad přehnaného nárůstu teploty vlivem proudu (soubor 13 - 13.1.2018 06:20:11 - 14.1.2018 00:19:51)



Obr. 12: Příklad nedostatečné nárůstu teploty vlivem teploty uvnitř vozu (soubor 19 - 17.9.2018 04:27:41 - 17.9.2018 23:12:37)

Z těchto výsledků by se mohlo zdát, že metoda nejmenších čtverců vychází vždy stejně nebo hůře. Na Obr. 13 je proto uveden příklad, který sice není příliš zajímavý, ale je zde vidět, lepší výsledek metody nejmenších čtverců.



Obr. 13: Příklad lepšího výsledku pro metodu nejmenších čtverců (soubor 6 -17.12.2017 12:12:17 - 18.12.2017 00:18:35)

4. Simulace

Za účelem zjistit alespoň přibližně maximální teplotu, které by baterie v reálném provozu mohla dosáhnout, byla vytvořena jednoduchá simulace provozu po dobu 2 letních měsíců. Parametry pro simulaci byly vybrány z metody procházení různých variant, která byla v průměru o něco přesnější.

Pro simulaci byl použit průměrný kvadrát nabíjecího proudu 5000A^2 a vybíjecího 8000A^2 , samozřejmě s adekvátně delším časem nabíjení oproti vybíjení. U nabíjecího proudu se jedná o nejvyšší průměr nenulových hodnot ze všech souborů. V případě vybíjecího byl nejvyšší průměr $10\,000\text{A}^2$, nicméně snížení na 8000A^2 by mělo přibližně kompenzovat stání trolejbusu na zastávkách, tedy fakt, že se proud ve skutečnosti neodebírá celou dobu cesty mimo vedení.

Pro účely simulace se předpokládá, že celkový přivedený i odvedený proud jsou v delším časovém úseku stejné. Reálně je nabíjecí proud o něco nižší, jelikož se baterie nabíjí vyšším napětím, nicméně s ohledem na celkovou přesnost simulace nemá příliš význam se tímto rozdílem zabývat.

Pro simulaci průběhu vnější teploty byly využity záznamy denních nejnižších, nejvyšších a průměrných teplot v červenci a srpnu 2015 ze stanice ČHMU-Praha Klementinum.[6] Toto léto vychází jako průměrně nejteplejší za posledních 10 let.

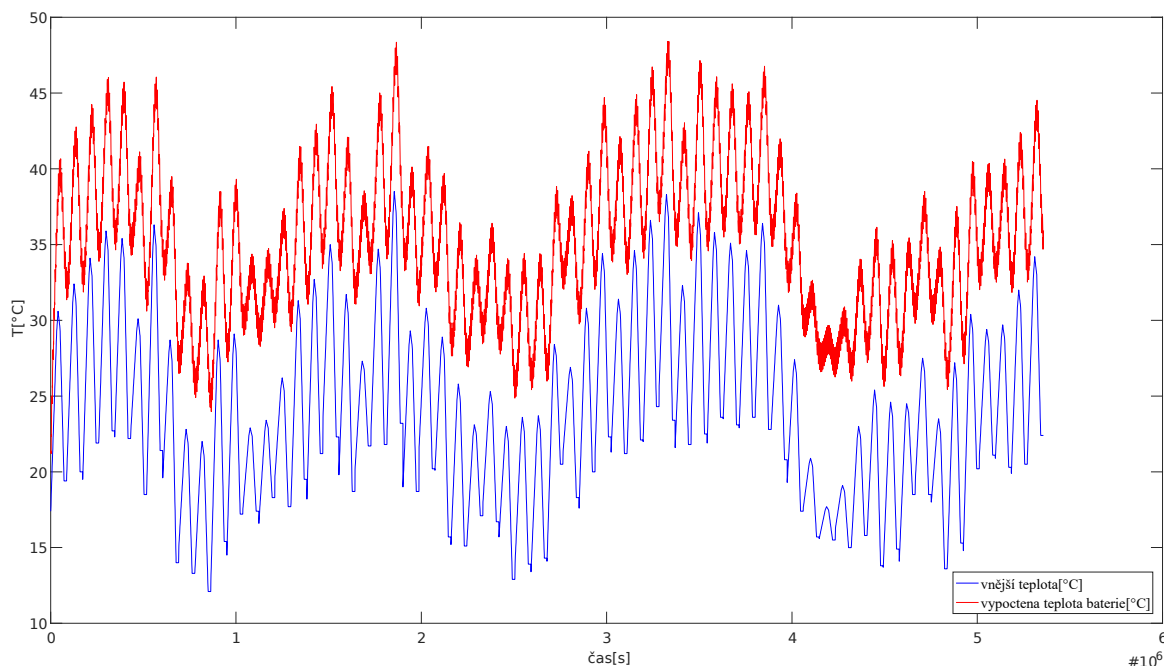
Dále se předpokládá vývoj teploty během dne přibližně následující:

- 0:00-4:00 stabilně minimální teplota
- 4:00-13:00 Přibližně lineární růst, končí na 90% cesty mezi minimem a maximem
- 13:00-15:00 Pomalejší pokračování růstu až do maxima
- 15:00-18:00 Pomalý pokles. konec na 10% cesty mezi maximem a minimem pro další den
- 18:00-0:00 Pokračování poklesu až na zítřejší minimum

Celý průběh se následně posunuje aby přesně vycházel denní průměr. Vnitřní teplota je pak v průměru o 4 stupně vyšší než vnější, což odpovídá dostupným letním datům z tachografů.

Vlastnosti uvažované trasy:

- Provoz 24 hodin denně
- Celková délka 30 minut v jednom směru, z toho 10 mimo trolej
- Stání na konečných zastávkách 10 minut



Obr. 14: Výsledek simulace (vývoj teploty během 2 měsíců)

Z grafu na Obr. 14 je patrné, že z dlouhodobého hlediska teplota baterie přibližně kopíruje průběh venkovní teploty přibližně o 10°C výše s výraznějšími odchylkami v místech kde se venkovní teplota výrazně mění, což je přirozené vzhledem k velké tepelné kapacitě baterie. Nejpodstatnější informací je, že se teplota baterie trvale drží pod 50°C, přičemž maximální provozní teplota je 65°C.

5. Závěr

Rekapitulace výsledků

	K [-]	α_1	α_2	dt_{in} [s]	dt_{out} [s]	Rd_{Tin} [$\Omega/^\circ\text{C}$]	Rd_{Tout} [$\Omega/^\circ\text{C}$]	Rd_{socin} [$\Omega/\%$]	Rd_{socout} [$\Omega/\%$]
Bez uvážení vnitřní teploty	5,37E-05	0,24944							
Bez časových posuvů	6,80E-05	0,49	0,5						
S časovými posuvy	8,82E-05	0,45375	0,393125	75	2461				
Metoda nejmenších čtverců	88.10-5	0,415737	0,324404	0	2520	-8,73E-05	4,26E-05	1,22E-06	-2,03E-06

Tabulka 1: Získané hodnoty parametrů ze všech použitých metod

Z dosažených výsledků uvedených v tabulce 1 můžeme s jistotou říci, že teplota baterie závisí na vnější teplotě i teplotě uvnitř vozu. Dále lze usuzovat, že závislosti vnitřních

odporů na teplotě a stavu nabití jsou buď, pravděpodobněji, zanedbatelné a nebo výrazně nelineární. Naopak časový posun vnější teploty se ukázal jako poměrně významný.

Při řešení této bakalářské práce byly využity 2 různé metody. První z nich, tedy výpočet teoretického průběhu teploty pro různé nastavení parametrů a jeho porovnání se skutečným průběhem, se ukázala jako přesnější při stejném počtu parametrů. Velkou nevýhodou ale byl výrazný nárůst časové náročnosti při přidávání parametrů. První verze se 2 parametry trvala v jednom běhu (tj. bez úpravy rozsahů) několik minut, druhá se 3 parametry několik desítek minut a poslední s 5 parametry i přes velkou snahu o optimalizaci a výrazné snížení počtu dat ve vstupních souborech několik hodin.

Naproti tomu metoda nejmenších čtverců zabrala i pro 7 parametrů řádově sekundy, při uvážení časových posunů teploty, které však byly řešeny stále předchozí metodou, pak minuty. Metoda nejmenších čtverců měla viditelně větší tendenci k přehnanému nárůstu teploty u souborů s mnoha úseky vyššího proudu (Obr. 11), naopak nárůst vlivem okolní teploty u ní byl příliš pomalý (Obr. 12). První metoda vykazuje stejné nedostatky, ale v menším měřítku. U většiny souborů jsou ale rozdíly mezi metodami velmi malé.

Vyšší přesnost první metody si lze vysvětlit zejména zahrnutím vypočtené teploty ve výpočtu její následující hodnoty. Díky tomu je tato metoda schopná odhalit kumulaci chyby v delším časovém úseku a kompenzovat ji. Je třeba také říci, že tato přesnost není zcela objektivní, jedná se totiž spíše o kompenzaci chyby pro konkrétní testované soubory než o odstranění její příčiny, která by se u jiných dat stejné baterie mohla projevat jinak.

Přes veškerou vynaloženou snahu je stále patrné, že použitý model vychází přesněji pro zimní data než většinu letních. U letních se vypočtené průběhy drží zpravidla pod naměřenými. Asi nejpravděpodobnějším vysvětlením je možnost ohřevu bateriového kontejneru od slunce. Této teorii nasvědčuje fakt, že k výraznějším chybám dochází spíše u souborů, kde vnitřní teplota vozu dosahuje až přes 30°C.

Obdobný efekt by mohla mít nelineární teplotní závislost vnitřních odporů, tedy pokud by se s vyšší teplotou výrazně zvyšoval jejich nárůst za změnu teploty. K odchýlení se od reálného průběhu ale dochází spíše tam, kde se baterie ohřívá od okolí a proudy jsou

nulové nebo relativně zanedbatelné, takže tato varianta sice není vyloučena, ale rozhodně by nebyla jedinou příčinou.

Ze simulace provedené na závěr (Obr. 14) vyplývá, že baterie by i za nepřetržitého provozu měla dosahovat nejvýše cca 50°C, neměla by tedy mít problém s dodržáním maximální provozní teploty 65°C. Z dostupných průběhů lze bez ohledu na metodu očekávat chybu do 5°C, ačkoliv její odhad je poměrně složitější, jelikož v letních souborech je velmi málo dat s vyššími proudy, které by nepochybně byly hlavní příčinou takového oteplení. Spíše se ale zdá, že úseky s vyššími proudy vycházejí přesněji.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] LAVETY, Sandhya, Anurag P. BHALE, Ritesh KUMAR KESHRI, Madhuri A. CHAUDHARI a Takumi KIMURA. Electro-thermal model of traction battery for regulated pulse charging. IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [online]. IEEE, 2017, 2017, , 2270-2274 [cit. 2019-06-01]. DOI: 10.1109/IECON.2017.8216382. ISBN 978-1-5386-1127-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8216382/>
- [2] TAGUCHI, Yoshiaki, Atsuto TERADA, Masaki MIKI, Kenji HATAKEDA a Takumi KIMURA. Evaluation of a Thermal Network Model for the Traction Battery of the Battery-Powered EMU. 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) [online]. IEEE, 2015, 2015, , 1-6 [cit. 2019-06-01]. DOI: 10.1109/VPPC.2015.7352944. ISBN 978-1-4673-7637-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7352944/>
- [3] M. Jahoda. Počítačová dynamika tekutin – užitečný nástroj pro inženýry [online prezentace]. 2014 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/bezpecnostni_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf
- [4] FRÝZL, Jaroslav. ET02090P b - TRAKČNÍ BATERIE: Dílenská příručka Trolejbus 26Tr. ŠKODA ELECTRIC a.s. Tylova 1/57 301 28 Plzeň Czech Republic, 2017.
- [5] Robert Mařík. Metoda nejmenších čtverců. [online prezentace]. 2006 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: user.mendelu.cz/marik/wiki/aplikace/mnc-cz.pdf
- [6] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Denní data ze stanice Praha Klementinum. Český hydrometeorologický ústav [online]. 2019 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/praha-klementinum#>

Přílohy

S ohledem na rozsah a charakter příloh jsou všechny přílohy uvedeny na přiloženém CD