



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VÝMĚNÍK TEPLA PRO SYSTÉMY TEPLOTNÍHO ŘÍZENÍ BATERIOVÝCH MODULŮ V ELEKTRICKÝCH VOZIDLECH: EXPERIMENT A SIMULACE

HEAT EXCHANGER FOR THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS OF BATTERY MODULES OF ELECTRIC
VEHICLES: EXPERIMENT AND SIMULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Grygar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Boháček, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Jan Grygar
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jan Boháček, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výměník tepla pro systémy teplotního řízení bateriových modulů v elektrických vozidlech: experiment a simulace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Akumulátory v elektrických vozidlech jsou složeny z Li-ion článků, které při nabíjení a vybíjení produkují teplo. Za účelem prodloužení životnosti akumulátoru je nutno teplo efektivně odvádět tak, aby bylo dosaženo minimálního teplotního rozdílu mezi jednotlivými články a nebyla překročena maximální povolená teplota každého z článků. Zatímco lze menší až střední výkony uchladiť nucenou konvekcí vzduchu od ventilátoru, pro velké výkony je výhodnější využití kapalinového chlazení. V Laboratoři přenosu tepla a proudění byl ve spolupráci s průmyslovým partnerem vyvinut a vyroben prototyp chladiče pro Li-ion články typu 18650. Chladič se skládá z mnoha dutých polymerních vláken zalitých v lehkém a odolném polymeru. Teplonosná látka např. voda proudí uvnitř vláken. Pro testování prototypů podobných chladičů bývá namísto elektrických článků běžně využito topných patron vložených do vhodně tvarovaného hliníkového obalu. Tento inženýrský přístup však není ideální, jelikož ignoruje reálný teplotní gradient uvnitř skutečného článku.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce bude prvně provést rešerši na existující modely popisující generování tepla uvnitř elektrických článků. Dále bude cílem práce zjistit, zdali bývají při testování prototypů chladiče používány i skutečné elektrické články, případně s jakým typem zátěžových cyklů a proč. Cílem práce bude též otestovat prototyp z polymerních vláken osazených články typu 18650. Budou uvažovány různé typy zátěžových cyklů a rozsah průtoků chladicího media. Kromě výkonových charakteristik bude proměřena i tlaková ztráta chladiče. S pomocí CFD výpočtu bude zmapováno rozložení průtoků přes jednotlivé paralelní větve polymerního chladiče. V numerickém modelu bude zahrnuto stochastické rozdělení hydrodynamických odporů jednotlivých větví. Předpokládá se využití open-source softwaru OpenFOAM společně se síťovacím nástrojem SnappyHexMesh.

- rešerše na modely generování tepla během nabíjení a vybíjení Li-iontových elektrických článků,
- způsoby testování výměníků tepla pro teplotní management bateriových modulů, typy zátěžových cyklů,
- měření výkonu prototypového chladiče z polymerních vláken osazeného články typu 18650,
- měření tlakové ztráty chladiče,
- CFD simulace rozdělení průtoků do jednotlivých paralelních větví chladiče.

Seznam doporučené literatury:

MOUKALLED, F., MANGANI, L., DARWISH, M., The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab, Springer, 2016.

BOHACEK, J., RAUDENSKY, M., KARIMI-SIBAKI, E., Polymeric hollow fibers: Uniform temperature of Li-ion cells in battery modules, Applied Thermal Engineering 159, 2019, 113940.

BOHACEK, J., RAUDENSKY, M., KROULIKOVA, T., KARIMI-SIBAKI, E., Polymeric hollow fibers: A supercompact cooling of Li-ion cells, International Journal of Thermal Sciences 146, 2019, 106060.

WELLER, H.G. , TABOR, G., JASAK, H., FUREBY C., A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, Computers in Physics, 12/6, 1998.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá výměníkem z polymerních vláken. První část je věnována teplem, které je generováno během nabíjecích a vybíjecích procesů. Experimentálně je testován chladicí výkon při různém zatížení a je pozorován vliv průtoku na teplotu baterií. A je proveden CFD výpočet pomocí opensource programu OpenFOAM, pro zjištění jak je rozložený průtok v jednotlivých větvích výměníku.

KLÍČOVÁ SLOVA

CFD simulace, OpenFoam, výměník, polymerní vlákna, baterie, chlazení

ABSTRACT

This thesis deals with a heat exchanger made of polymeric hollow fibers. The first part is devoted to the heat generated during charging and discharging processes. The cooling performance at different loads is experimentally tested and the effect of the flow rate on the battery temperature is observed. And a CFD simulation is performed using an opensource program OpenFOAM to see how the flow rate is distributed in the different branches of the heat exchanger.

KEYWORDS

CFD simulation, OpenFoam, heat exchanger, polymeric fibers, battery, cooling

GRYGAR, Jan. *Výměník tepla pro systémy teplotního řízení bateriových modulů v elektrických vozidlech: experiment a simulace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, 2023, 76 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Boháček, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Jan Grygar
VUT ID autora: 200903
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Výměník tepla pro systémy teplotního řízení bateriových modulů v elektrických vozidlech: experiment a simulace

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové panu doc. Ing. Jan Boháček, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a svým známým, kteří mě během celého studia podporovali.

Obsah

Úvod	19
1 Lithium-iontové články	21
1.1 Základní pojmy	21
1.2 Způsoby testování výměníků tepla pro tepelné řízení baterií	23
2 Vliv teploty na Li-ion baterie	25
2.1 Snížení kapacity a výkonu	25
2.2 Thermal runaway (tepelný lavinový jev)	26
2.3 Samovybíjení	27
3 Nabíjení a vybíjení	29
3.1 Nabíjecí charakteristiky	29
3.2 Nabíjecí metody	32
3.2.1 CC-CV	32
3.2.2 CP-CV	33
3.2.3 Vícestupňové nabíjení	34
3.2.4 Pulzní nabíjení	34
3.2.5 Boostcharging metoda	35
3.2.6 VCP	36
4 Generování tepla v Li-iontových bateriích	39
4.1 Elektrochemicko-tepelný model	40
4.2 Multi-fyzikální model	42
4.3 Model vzniku tepla v důsledku změny entropie	42
4.4 Model vzniku tepla v důsledku tepelného lavinového jevu	43
4.5 Model vzniku tepla v důsledku vnitřního odporu	44
4.6 Empirický model	44
5 Praktická část studentské práce	47
5.1 Experimentální měření	47
5.1.1 Výsledky měření	48
5.2 CFD simulace	50
5.2.1 Geometrie	51
5.2.2 Výpočetní síť	51
5.2.3 Kontrola výsledné sítě	55
5.2.4 Nastavení okrajových a počátečních podmínek	56
5.2.5 Numerická schémata a řešič	57

5.2.6	Výsledky simulace	60
Závěr		67
Literatura		69
Seznam symbolů a zkratek		75

Seznam obrázků

2.1	Grafické znázornění vlivu teploty na kapacitu baterie [18]	26
2.2	Charakteristiky teploty, proudu a napětí při nabíjení CV [22]	27
2.3	Závislost rychlosti samovybíjení na teplotě [23]	27
3.1	Nabíjecí charakteristika CV [24]	30
3.2	Nabíjecí charakteristika CC [24]	31
3.3	Nabíjecí charakteristika CP [24]	32
3.4	Schéma nabíjecí metody CC-CV [25]	33
3.5	Schéma nabíjecí metody CP-CV[25]	33
3.6	Schéma víceetapové nabíjecí metody MCC-CV [25]	34
3.7	Schéma pulzní nabíjecí metody [25]	35
3.8	Schéma boostcharging nabíjecí metody [25]	36
3.9	Schéma nabíjecí metody VCP [25]	37
4.1	Schéma ideálního adiabatického kalorimetru	45
4.2	Barevné značení termočlánků dle americké ANSI a mezinárodní IEC normy [46]	46
5.1	Rozmístění jednotlivých termočlánků	48
5.2	Průběh teplot při průtoku 5 l/hod a vybíjecím proudem 5 A	49
5.3	Závislost maximální teploty na průtoku chladicí kapaliny	50
5.4	Závislost maximálního rozdílu teplot na průtoku chladicí kapaliny	50
5.5	Zjednodušený model	51
5.6	Postup při tvorbě sítě	52
5.7	blockMesh	53
5.8	Refinement level	54
5.9	Finální síť	54
5.10	Odlíšné provedení vstupu a výstupu média	60
5.11	Rozložení průtoků v jednotlivých větvích	61
5.12	Míra nestejnomyšného rozložení průtoků ve vláknech pro variantu (a)	62
5.13	Míra nestejnomyšného rozložení průtoků ve vláknech pro variantu (b)	62
5.14	Měření variability průměru	64
5.15	Četnost jednotlivých průměrů	64
5.16	Míra nestejnomyšného rozložení průtoků ve vláknech pro průtok 2 l/h varianta (c)	65

Seznam tabulek

1.1	Hodnoty C-rate a jejich provozní doba	22
2.1	Vysokoteplotní cyklování baterií a jejich dopad na kapacitu baterie . .	25
5.1	Technické parametry baterie	47

Úvod

Elektromobily (EV) jsou další etapou revoluce v automobilovém průmyslu, a to hlavně z důvodu, že nabízejí ekologičtější a udržitelnější způsob dopravy. Nedílnou součástí každého EV je akumulátor, jenž se skládá z Li-ion článků. Články jsou vystaveny různým provozním podmínkám, jako je nabíjení, rychlonabíjení, vybíjení nebo regenerační brzdění. Během těchto procesů se vytváří značné množství tepelné energie, které musí být účinně odváděno pro zachování optimálního výkonu a životnosti. Vysoké teploty mohou způsobovat degradaci materiálu baterie nebo ohrozit bezpečnost systému. Naopak nízké teploty také nejsou žádoucím jevem a mohou vést ke snížení kapacity baterie a zvýšení vnitřního odporu, který má vliv na dojezď a výkon elektromobilu.

Výměníky jsou tedy nezbytnou součástí u kapalinou chlazených systémů pro udržování a regulaci optimální teploty. Slouží jako rozhraní, které zvětšuje plochu pro přenos tepla a zlepšuje tepelnou vodivost mezi baterií a chladicím médiem. Záleží také na typu chladicího procesu. Rozlišují se dva typy chlazení, aktivní a pasivní. Aktivní chlazení využívá mechanické stroje jako jsou čerpadla, ventilátory nebo kompresory k zajištění cirkulace chladicího média. Článek je přímo chlazený, tudíž zvládají vyšší tepelné zatížení. Pasivní chlazení se spoléhá na přirozený přenos tepla vedením, konvekcí a sáláním bez použití mechanických strojů. K přenosu tepla se používají chladiče, tepelné trubice nebo materiály s fázovou přeměnou (PCM). Ve srovnání s aktivním chlazením je jednodušší a energeticky účinnější, ale nezvládá větší tepelné zatížení. Pro maximalizaci výkonu a efektivnosti by se v provozu měly využít oba typy chlazení.

Aktivní chladicí systémy lze rozdělit na klasické kapalinové systémy, systémy chlazené vzduchem a systémy s parním kompresním cyklem (VCC). Technologie chlazení se neustále vyvíjí a přichází s novými způsoby chlazení s využitím nových materiálů, jako jsou nanostrukturované chladiče nebo materiály tepelného rozhraní (TIM). [1]

Při navrhování výměníku tepla pro systémy teplotního řízení je třeba vzít v úvahu aspekty, jako je účinnost přenosu tepla, tlaková ztráta, hmotnost, velikost a kompaktnost.

Tato práce se zabývá plastovým prototypem výměníku z polymerních vláken pro chlazení bateriových článků kapalným médiem. Cílem praktické části je experimentálně sledovat chladicí výkon výměníku. V další části je zkoumáno rozložení průtoku v jednotlivých paralelních větvích pomocí CFD simulace.

1 Lithium-iontové články

Lithium-iontové (Li-ion) akumulátory o vysoké energetické hustotě a vysokém napětí se běžně používají v přenosných zařízeních, jako jsou mobilní telefony nebo notebooky. S prvním komerčním použitím přišla firma SONY Energytec v roce 1991. Výzkum a vývoj technologií (RTD) navíc v posledních letech vstoupil do fáze komercializace pro vysoce výkonné systémy jako např. baterie pro fotovoltaickou a větrnou energetiku, hnací zdroj pro elektrická (EV) a hybridní (HEV) vozidla, a velké baterie pro umělé družice.

Mezi hlavní přednosti Li-ion baterií patří [2] [3]:

- Dlouhá cyklická životnost
- Nízká hmotnost
- Vysoká energetická hustota
- Vysoké nominální napětí - typicky kolem 3,6 až 3,7 V
- Nízké samovybíjení - 8-10 % za měsíc
- Šetrné k životnímu prostředí - neobsahují Pb, Rt, Ca

1.1 Základní pojmy

Kapacita

Hodnota kapacity baterie je definována jako celkové množství elektrické energie vyrobené elektrochemickými reakcemi v baterii, značí se Q a udává se v jednotkách Ampérhodin (Ah). Kapacita baterie je tedy elektrická energie, kterou může baterie při vybití dodat za určitý čas. Hodnota udané kapacity na štítku baterie se nazývá jmenovitá kapacita. Závisí na počtu aktivních materiálů v elektrodách, které ukládají energii. A také na hustotě elektrolytu, s vyšší hustotou stoupá i kapacita, ale na druhou stranu klesá životnost baterie. Proto nelze hustotu elektrolytu zvyšovat podle našich potřeb. [4]

State of Charge

Stav nabití neboli State of Charge (SoC), je parametr sledující poměr aktuální uložené energie obsažené v akumulátoru k celkové kapacitě akumulátoru. Stanovení SoC je zásadní pro používání baterií a existuje proto mnoho metod pro stanovení SoC, které se dělí do těchto základních kategorií:

1. Přímé měření - např. metoda svorkového napětí
2. Book-keeping odhad - např. metoda coulomb counting
3. Adaptivní systémy - např. metoda neuronových sítí nebo Kalmanův filtr
4. Hybridní metody - např. kombinace Kalmanova filtru a Coulombova počítání

Obecně se SoC definuje jako poměr aktuální kapacity $Q(t)$ k nominální kapacitě $Q(n)$. Nominální kapacita je udávána výrobcem a představuje maximální množství náboje, které lze do akumulátoru uložit. [2]

$$SoC(t) = \frac{Q(t)}{Q(n)} \cdot 100; [\%] \quad (1.1)$$

Depth of Discharge

Hloubka vybití neboli Depth of Discharge (DoD) vyjadřuje množství energie, které bylo spotřebované z plně nabitě baterie. DoD má významný vliv na celkovou životnost baterie, a proto pomáhá udávat přibližnou životnost baterie. Obecně se DoD uvádí v procentech. Je-li hodnota DoD baterie 0 %, znamená to, že je baterie plně nabitá a SoC je 100 %. Pokud je hodnota DoD 100 %, je baterie vybitá a SoC je 0%. [5]

C-rate

Při popisu baterií se vybíjecí a nabíjecí proud často vyjadřuje jako "C-rate". Je to míra vybíjení/nabíjení baterie v poměru k její maximální kapacitě.

Obecný vzorec pro výpočet C-rate vypadá následovně:

$$C = \frac{I}{Q} [h^{-1}] \quad (1.2)$$

V případě vybíjení baterie s kapacitou 100 Ah při hodnotě 1C, vybíjecí proud o hodnotě 100 A vybijí celou baterii za 1 hodinu. Při 10C by se vybíjecí proud rovnal 1000 A a baterie by byla vybita za 6 minut. Jednotlivé hodnoty C-rate a jejich doba provozu jsou uvedeny v tab. 1.1. Je důležité brát v potaz, že při vyšších hodnotách C-rate může být část energie přeměněna na teplo, což může mít za následek snížení kapacity o 5% nebo více. [6]

C-rate	Čas
30C	2 min.
20C	3 min.
10C	6 min.
5C	12 min.
2C	30 min.
1C	1 hod.
0,5C (C/2)	2 hod.
0,2C (C/5)	5 hod.

Tab. 1.1: Hodnoty C-rate a jejich provozní doba

Životnost

Životnost baterie je měřítkem výkonu a délky života, která se většinou vyjadřuje pomocí počtu nabíjecích cyklů, kterou je baterie schopna absolvovat. Parametr životnosti uvedený výrobcem není přesný a vždy záleží na:

1. provozní a skladovací teplotě
2. metodě nabíjení a vybíjení
3. DoD a doba trvání daného stavu, případně době trvání přebíjení
4. materiál z kterého je sestavena baterie a kvalitě zpracování [2]

1.2 Způsoby testování výměníků tepla pro tepelné řízení baterií

Výměníky tepla pro elektromobily se často testují bez skutečných elektrických článků. Místo toho se k posouzení účinnosti a výkonu výměníků často využívají simulované elektrické články nebo zkušební zařízení. Napodobují teplotní charakteristiku a požadavky skutečných elektrických článků. Jejich použití během testování může být totiž finančně nákladné a případně i nebezpečné. Po optimalizaci konstrukce výměníku tepla, se může přejít na testování v reálném provozu za pomoci prototypů elektrických vozidel nebo jejich součástí. I v tomto případě se často využívají náhradní modely elektrických článků, z důvodu snížení nákladů a eliminaci potenciálních rizik spojených s použitím bateriových článků.[7][8][9] Je však třeba poznamenat, že některé experimentální nebo odborné aplikace, zejména v rámci výzkumných a vývojových iniciativ, mohou zahrnout itegraci elektrických článků s výměníky tepla.[10][11][12] Nejsou ovšem běžným postupem v automobilovém průmyslu.

1. Computational fluid dynamics (CFD)

Je numerická metoda pro modelování proudění tekutin a přenosu tepla výměníkem tepla. Tato metoda může poskytnout podrobné informace o rozložení rychlosti, tlaku a teploty ve výměníku tepla, což umožňuje optimalizovat návrh a provozní podmínky. Simulace CFD je účinným nástrojem pro předpovídání výkonu výměníku tepla a vyhodnocování konstrukčních úprav před fyzickým testováním. Vyžaduje však pokročilé znalosti mechaniky tekutin a může být výpočetně nákladná. [13]

2. Teplotní cyklická zkouška

Je proces při kterém se baterie vystavují opakovaným cyklům změn teploty. V rámci předem definovaného teplotního rozsahu většinou jsou uvažovány extrémní podmínky. Všechno se odehrává v kontrolovaném prostředí. Teplotní cyklování se provádějí s cílem simulovat reálné podmínky a vyhodnotit, jak baterie fungují při těchto výkyvech. [14]

3. Test tepelného výkonu

Zkouška tepelného výkonu je metoda měření rozdílu teplot mezi vstupem a výstupem výměníku tepla při průtoku kapaliny výměníkem. Tato metoda poskytuje kvantitativní měřítko účinnosti přenosu tepla výměníku tepla a lze ji použít k vyhodnocení dopadu různých konstrukčních úprav. Zkoušení tepelné účinnosti je základním nástrojem pro charakterizaci výkonnosti výměníků tepla za různých provozních podmínek. Může však být časově náročné a vyžaduje specializované vybavení. [15]

4. Měření tlakových ztrát

Zkouška poklesu tlaku je jednoduchá a účinná metoda pro vyhodnocení průtoku a účinnosti výměníku tepla. Měřením tlakové ztráty na výměníku tepla lze určit průtok chladicí kapaliny a identifikovat případná omezení nebo ucpání systému. Zkouška tlakové ztráty je cenným diagnostickým nástrojem pro řešení problémů s výkonem výměníku tepla. Snížením tlakové ztráty lze zvýšit celkovou účinnost chladicího systému. [16]

5. Termovizní snímání

K měření se využívají infračervené kamery, které snímají teplotu výměníku tepla a bateriového modulu. Tento způsob měření dokáže rychle identifikovat oblasti s vysokou teplotou, která mohou následně vést k nekontrolovatelnému zvyšování teploty. Kamerou můžeme také zhodnotit účinnost výměníku při chlazení bateriového modulu. Tato metoda poskytuje pouze povrchový pohled na rozložení teplot a tudíž nám nemusí zachytit komplexní obraz tepelného chování celého systému. [17]

6. Testování v reálném provozu

Testování výměníků tepla pro řízení teploty baterií přímo v prototypu elektrického vozidla. Testuje se za reálných jízdních podmínek, při kterém lze zhodnotit jeho účinnost při regulaci teploty baterií. Tato metoda zajistí maximální efektivitu při provozu elektrických vozidel za různých situací a také jejich bezpečnost.

2 Vliv teploty na Li-ion baterie

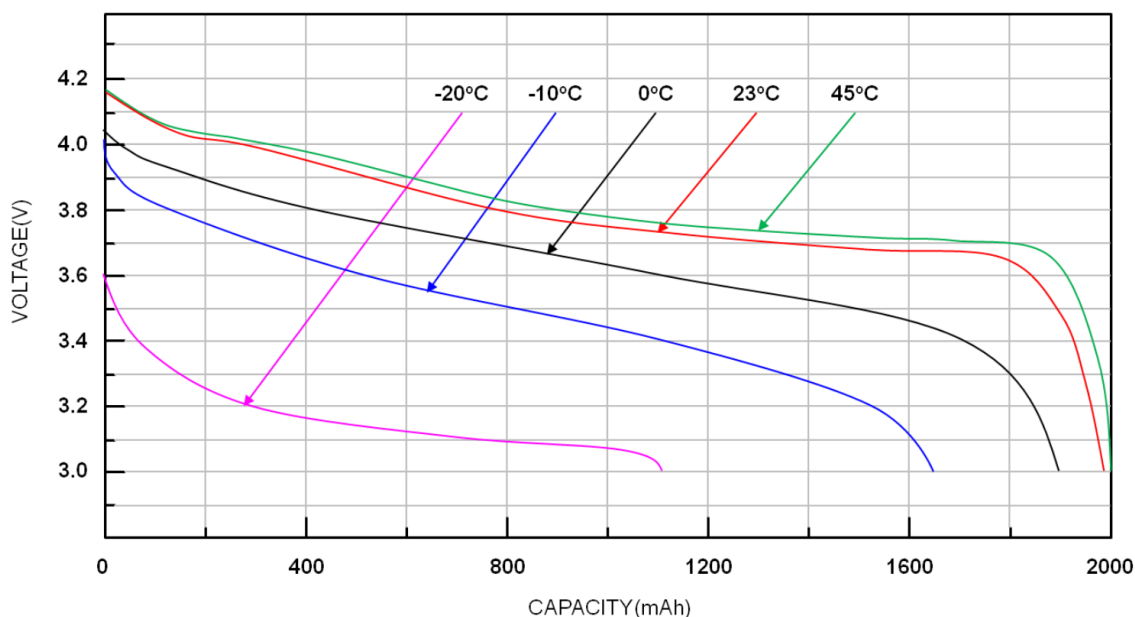
Výkon, životnost a bezpečnost lithium-iontových baterií jsou ovlivněny jejich provozní teplotou. Mezi hlavní tepelné rizika patří snížení kapacity/výkonu, tepelný lavinový jev (Thermal Runaway), elektrická nerovnováha atd.

2.1 Snížení kapacity a výkonu

Snížení výkonu lithium-iontových baterií lze definovat jako ztrátu dostupné energie (snížení kapacity nebo výkonu). Dostupná energie se ztrácí, když se aktivní materiál uvnitř baterie přemění na neaktivní fázi, což snižuje kapacitu při libovolné rychlosti vybíjení. Výkon se snižuje, když se zvyšuje vnitřní odpor článku, což vede ke snížení napětí. Obecně vzato jsou mechanismy degradace článku závislé na jejich chemickém složení. Z jednotlivých experimentů v tab. 2.1 je vidět, že se kapacita snižuje při zvýšených teplotách které přesahují cca 45 °C, bez ohledu na chemickém složení článku nebo rychlosti vybíjení (DOD). Baterie také nevykazují žádný znatelný rozdíl v poklesu kapacity při použití odlišného vybíjecího napětí.

Materiál baterie	DOD	C-rate	Počet cyklů	Testovací teplota	Ztráta kapacity
C/LiCoO ₂	4.2–2.0 V	C/1.8	500	25°C	22.5%
				50°C	70.6%
C/LiCoO ₂	4.2–2.5 V	C/1	500	21°C	9.0%
				45°C	13.0%
C/LiMn ₂ O ₄	4.2–2.5 V	C/1	500	21°C	28.0%
				45°C	51.0%
C/LiCoO ₂	4.2–2.75 V	C/1	500	25°C	13.4%
				4.2–3.2 V	15.5%
				4.2–3.3 V	17.0%
				4.2–3.4 V	15.1%
				4.2–3.5 V	16.1%
				4.2–3.55 V	15.8%

Tab. 2.1: Vysokoteplotní cyklování baterií a jejich dopad na kapacitu baterie



Obr. 2.1: Grafické znázornění vlivu teploty na kapacitu baterie [18]

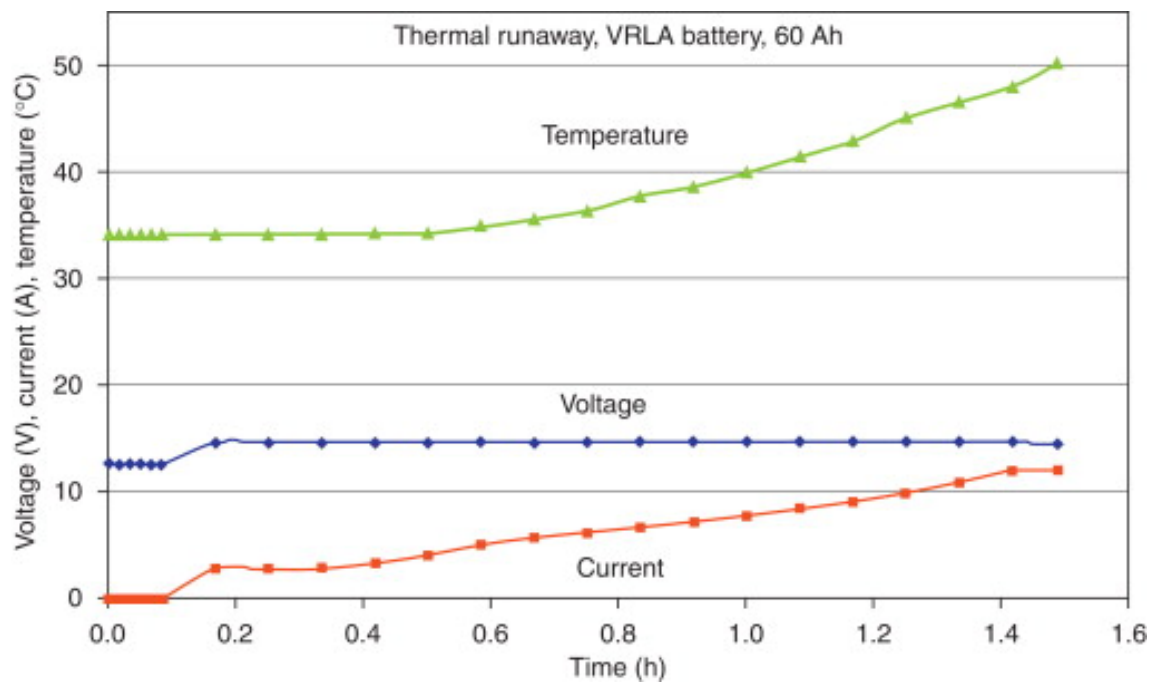
Z grafu 2.1 je vidno, že nejvyšší kapacitu mají baterie při teplotě 45 °C, což je zároveň horní hranice povoleného teplotního rozsahu. Běžně můžeme sledovat pouze teplotu na povrchu článku, přičemž vnitřní teplota je vyšší. Z tohoto důvodu by se měla baterie provozovat při teplotách kolem 20 °C a rozdíl v kapacitě by neměl být až tak velký.[19] [20]

2.2 Thermal runaway (tepelný lavinový jev)

Jedná se o stav v bateriích, ke kterému dochází, když se teploty prudce zvýší. A to je spouštěčem dalších exotermických reakcí, které generují další teplo. Vede to k nekontrolovatelnému zvyšování teploty a potencionálně k vyvolání škodlivějších reakcí. Jakmile teplota baterie dosáhne přibližně 80 °C, vrstva SEI se na anodě začne rozkládat a rozpadat v důsledku reakce lithia s rozpouštědly v elektrolytu. V rozmezí 100-120 °C se začíná rozkládat elektrolyt, za vzniku tepla a nebezpečných plynů. V rozmezí 120-130 °C, se začíná tavit separátor, kdy se do kontaktu dostávají elektrody anody a katody. Při nárůstu teploty nad 130 °C může baterie vzplanout. [21]

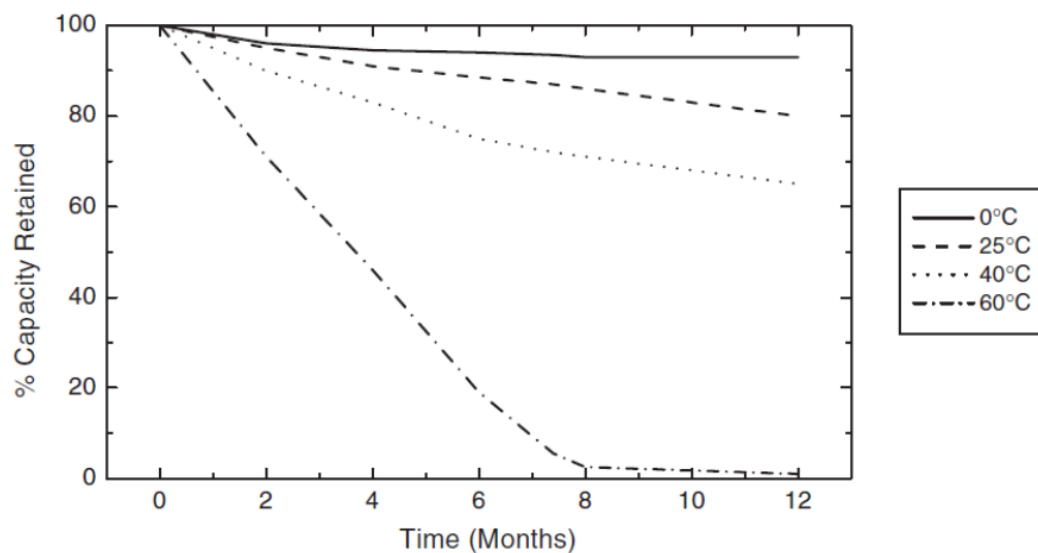
Hlavními příčinami může být přebíjení, nadměrné vybíjení, mechanické poškození nebo vystavování baterie vysokým teplotám. Nadměrné teplo je generované zátěžovým proudem. Vnitřní teplota baterie rychle roste, pokud není teplo účinně odváděno. V obr.2.2 je vidět vývoj nabíjecího proudu a teploty při nabíjení CV bez

jakékoliv regulace teploty. [19] [22]



Obr. 2.2: Charakteristiky teploty, proudu a napětí při nabíjení CV [22]

2.3 Samovybíjení



Obr. 2.3: Závislost rychlosti samovybíjení na teplotě [23]

Baterie se mohou samovybíjet, čímž se snižuje jejich zachovaná kapacita. Z následujícího grafu (2.3) je patrné, že při vyšších teplotách dochází uvnitř baterie k uvolňování chemické energie. Rychlost vybíjení je přímo úměrná teplotě. U lithium-iontových baterií, které jsou používány v EV, není samovybíjení tak důležité. U jiných aplikací, kde článek zůstává delší dobu nevyužit s kombinací teplejšího prostředí, tento efekt může být významným. [20]

3 Nabíjení a vybíjení

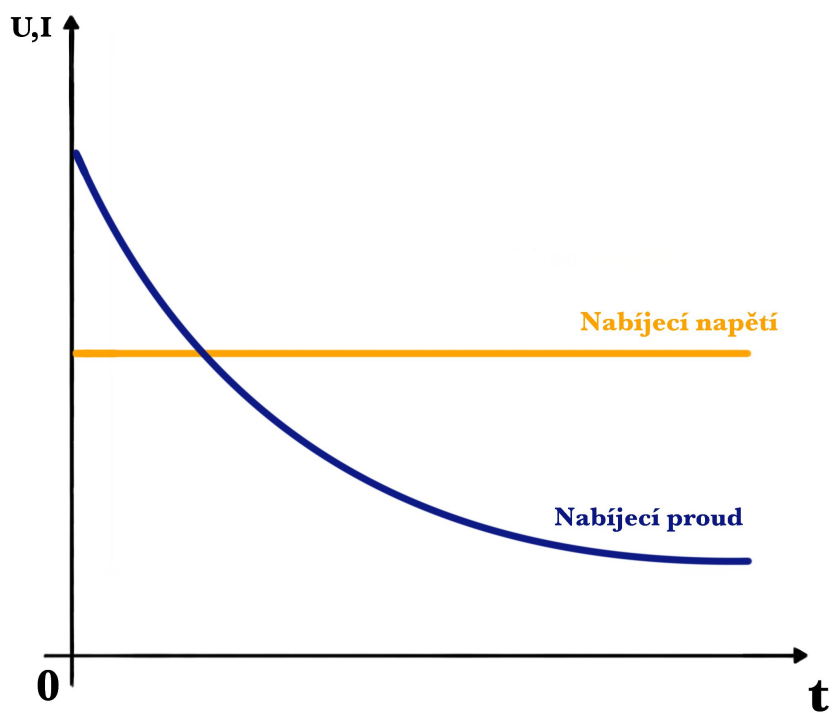
Během nabíjecího procesu je do baterie dodávána elektrická energie, která mění rovnováhu náboje mezi chemicky aktivními materiály, které jsou klíčové pro vnitřní elektrochemické reakce. Má-li být proces nabíjení účinný, efektivní a bezpečný, musí se dohlížet na napětí a proud, tak aby nedocházelo k nadměrnému nebo nedostatečnému nabíjení baterií. Při překročení určitého napětí může dojít ke zplynování baterie. Jedná se o běžný jev degradace výkonu baterie, který je obecně důsledkem rozkladu elektrolytu, k němuž dochází po celou dobu životnosti li-ion baterií bez ohledu na to, zda je baterie v provozu nebo ne. Při přebíjení dochází ke zplyňování především elektrochemickou oxidací rozpouštědel elektrolytu na katodě, přičemž ionty Li^+ z elektrolytu se redukují na kovové Li na anodě. Kromě toho, pokud je nabíjecí proud příliš vysoký, dochází k přehřátí baterie, kdy může dojít k jejímu poškození. Při přehřátí dochází k redoxnímu rozkladu, chemickému rozkladu rozpouštědel elektrolytu na anodě i katodě a k expanzi par těkavých rozpouštědel elektrolytu.

3.1 Nabíjecí charakteristiky

Nabíjecí charakteristika nám udává způsob nabíjení akumulátoru. Baterie má vždy výrobcem udávané konečné nabíjecí napětí a maximální nabíjecí proud, který může baterií protékat. Můžeme rozlišit 3 základní typy charakteristik:

Constant Voltage - CV

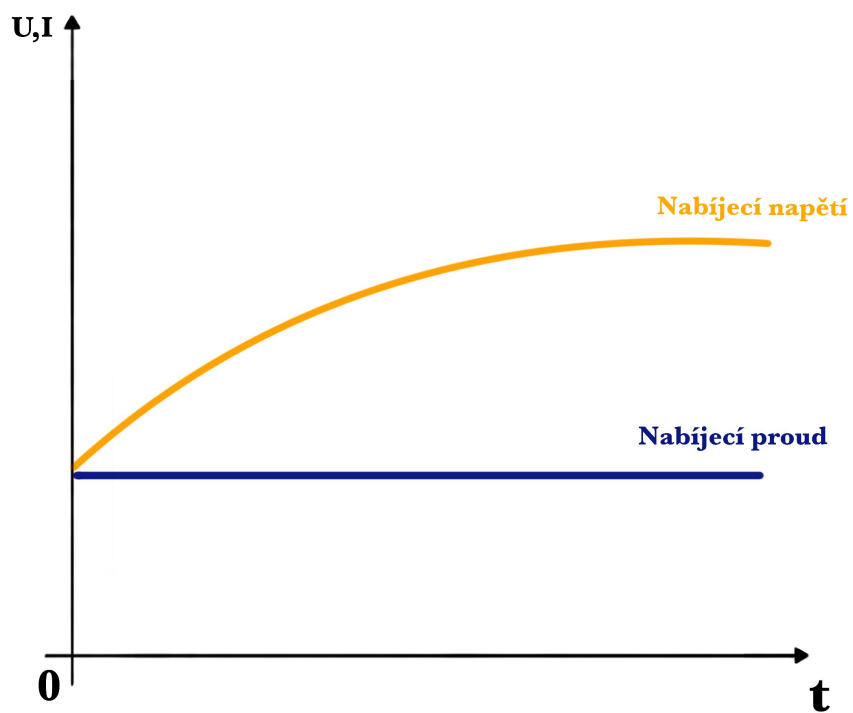
Při nabíjecím procesu je napětí nastaveno na konstantní hodnotu, velikost tohoto napětí je uvedeno výrobcem, ale u většiny li-ion baterií se tato hodnota pohybuje kolem 4.2 V. Proud je na začátku procesu na maximální hodnotě a postupem času klesá. Hodnota počátečního proud je závislá na tom, jak moc je baterie vybitá. Maximální hodnotu udává výrobce. Proces je ukončen ve chvíli, kdy proud dosáhne hodnoty cca 10% z maximální proudové hladiny. [24]



Obr. 3.1: Nabíjecí charakteristika CV [24]

Constant Current - CC

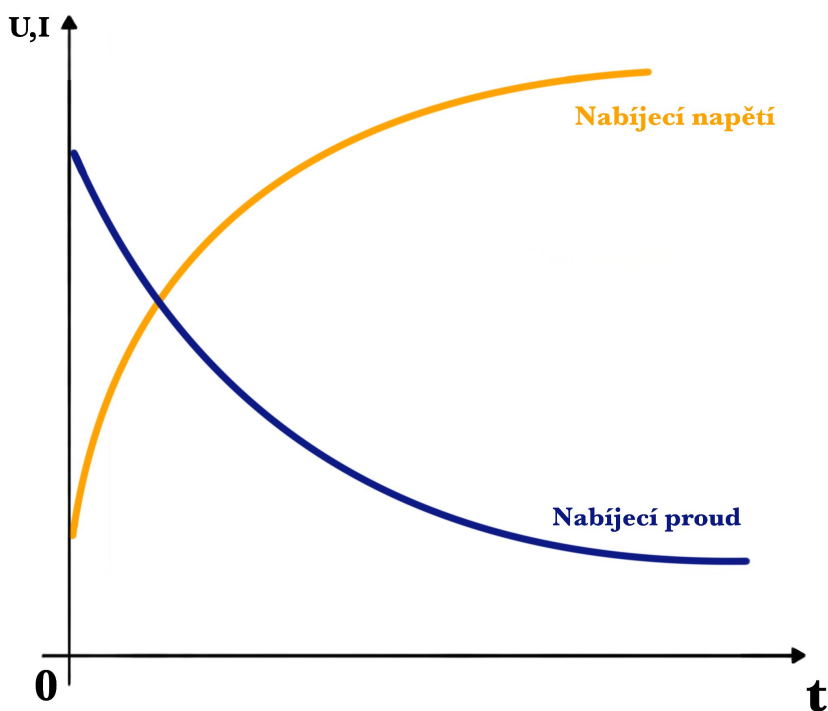
Po celou dobu nabíjecího procesu je proud konstantní. Napětí se po dobu nabíjení postupně zvyšuje. Tento způsob nabíjení je velmi bezpečný, nicméně rychlost nabíjení je velmi malá. [24]



Obr. 3.2: Nabíjecí charakteristika CC [24]

Constant Power - CP

Při nabíjení není ani jedna veličina konstantní. S narůstajícím napětím nám klesá proudová charakteristika. Proces nabíjení je zastaven když proud dosáhne cca 10 % z maximální proudové hladiny nebo předem nastavené hodnoty. [24]

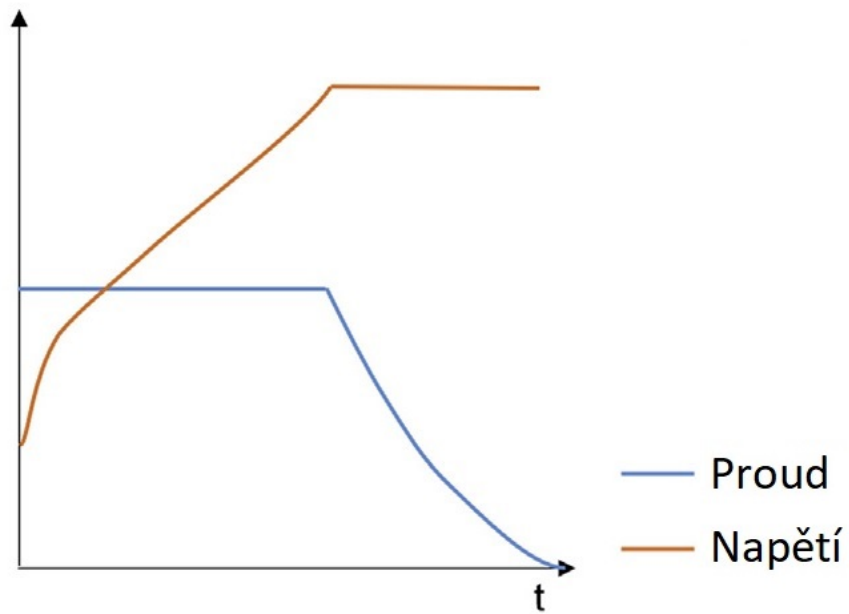


Obr. 3.3: Nabíjecí charakteristika CP [24]

3.2 Nabíjecí metody

3.2.1 CC-CV

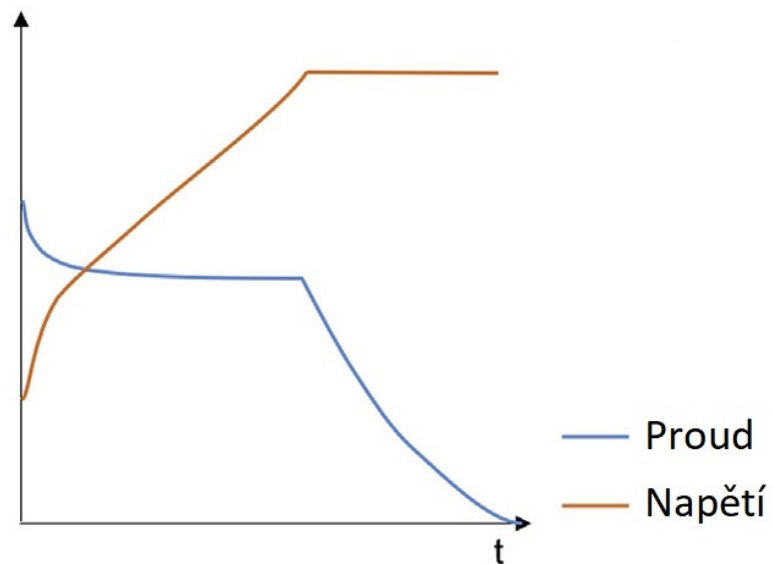
Jedná se o jednu z neznámějších metod nabíjení li-ion baterií. Skládá se ze dvou fází, nabíjení konstantním proudem, kdy se napětí baterie zvedá až na mezní hodnotu (CC), poté následuje fáze konstantního napětí, dokud proud neklesne téměř na nulu cca 10 % maximálního proudu (CV). CV fáze umožňuje disperzi koncentračních gradientů v částicích elektrody a je obvykle nezbytná pro dosažení vysokého využití kapacity bez překročení maximálního napětí. Jelikož proud během druhé fáze postupně klesá, doba nabíjení se ve srovnání s nabíjením pouze první fází výrazně prodlužuje. Tato metoda se díky jednoduchosti a snadné aplikaci využívá poměrně často ve většině případů. Další metody zmíněné v této kapitole ovšem umožňují zkrátit dobu nabíjení, zvýšit účinnost nebo zlepšit kapacitu nebo zachování výkonu. [25]



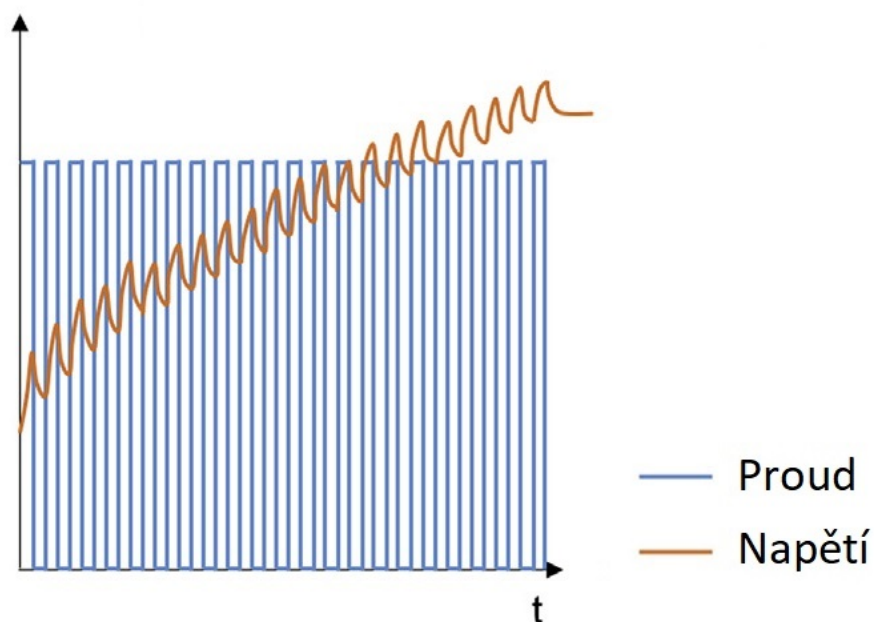
Obr. 3.4: Schéma nabíjecí metody CC-CV [25]

3.2.2 CP-CV

CP-CV metoda je podobná CC-CV metodě s rozdílem, že v první fázi s narůstajícím napětím klesá proud. [25]



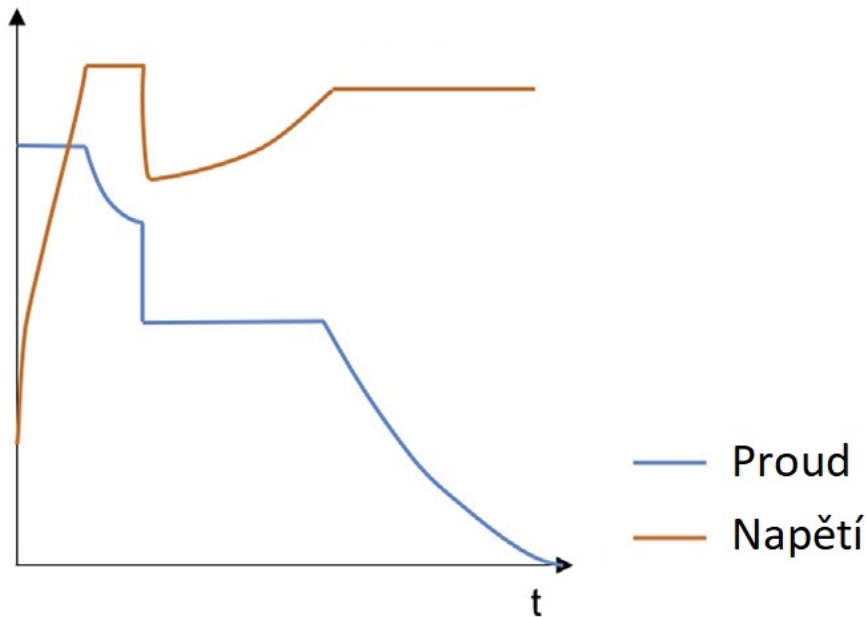
Obr. 3.5: Schéma nabíjecí metody CP-CV[25]



Obr. 3.7: Schéma pulzní nabíjecí metody [25]

3.2.5 Boostcharging metoda

Nabíjení Boostcharging je vyvinuto jako velmi rychlá metoda nabíjení pro li-ion baterie. Vyznačuje se vysokou průměrnou hodnotou proudu na začátku nabíjecího cyklu, poté následuje úsek s CC-CV fází s mírnějšími proudy. Škodlivý účinek nabíjení baterie vysokým proudem je zohledněn, aby tento způsob nepřinášel žádné negativní účinky na degradaci baterie. [25] [26]



Obr. 3.8: Schéma boostcharging nabíjecí metody [25]

3.2.6 VCP

Existuje řada složitějších proměnných proudových profilů, které jsou většinou navrženy pro rychlejší nabíjení. Mezi tyto profily patří např.

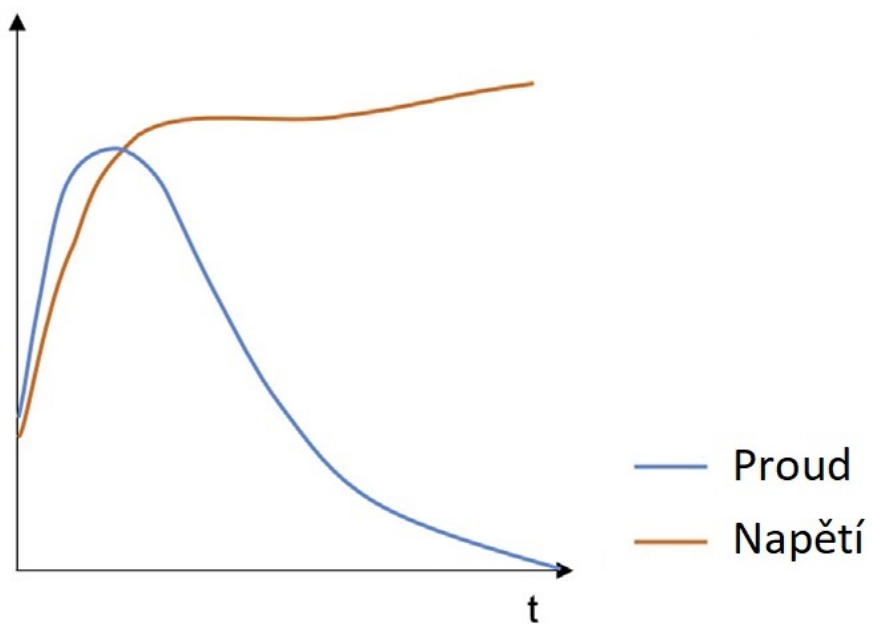
- **VCD - Varying Current Decay**

Navrženo pro rychlejší nabíjení než běžná metoda CC-CV a zároveň aby byl méně náchylný k poškození než při čistém nabíjení konstantním napětím. V prvních cyklech dosahoval lepšího využití kapacity, ale v konečném srovnání s CC-CV metodou, byly ztráty kapacity výrazně vyšší. Možná příčina zrychlené degradace bylo přebíjení katody.

- **UVP - Universal Voltage Protocol**

Byl navržen tak, aby zrychlil proces nabíjení a snížil energetické ztráty způsobené zahříváním, a tím zvýšil účinnost. Metoda je odvozena ze souboru nabíjecích křivek CC-CV s použitím optimalizačního algoritmu nastavena pro určitou dobu nabíjení a cílové svorkové napětí. Proměnný proudový profil se vypočítá z UVP a odporu článku. S výraznějším opotřebením baterie, je potřeba přepočítat proudový profil kvůli změně odporu, zatímco napěťový profil zůstává stejný. Bez ohledu na stáří je hodnota proudu vždy nízká a na začátku procesu rychle narůstá, protože odpor článku je nejvyšší právě při 0% SoC a poté zase rychle klesá. [27] [25]

- **Vícestupňové nabíjení s konstantní rychlostí ohřevu**



Obr. 3.9: Schéma nabíjecí metody VCP [25]

4 Generování tepla v Li-iontových bateriích

Jelikož výkon Li-iontových baterií je silně spjat s teplotou, tak je důležité pochopit, jak dochází ke vzniku tepla uvnitř baterie. Jde o složitý proces, který vyžaduje pochopení dílčích procesů podílejících se na vzniku tepla. Hlavními tepelnými zdroji jsou:

1. Jouleovo teplo - Při průchodu elektrického proudu přes různé komponenty baterie, nosiče nábojů narážejí do kmitajících atomů mřížky a část kinetické energie je tím předána. Dochází k zahřívání a vzniklé teplo je označeno za Jouleovo nebo ohmické, pro které platí:

$$Q_J = R \cdot I^2 \cdot t \quad (4.1)$$

Odpor je přímo závislý na teplotě, čím větší teplota, tím je odpor větší. Proto vztah z rov.4.1 lze uplatnit při menších změnách teploty. [28]

2. Nevratné reakce - Jedná se o vedlejší procesy, které se mohou vyskytnout na rozhraní elektrody a elektrolytu nebo i přímo v samotném elektrolytu. Příkladem je rozklad elektrolytu v souvislosti s přebíjením nebo vystavováním baterie vysokým teplotám. Mohou vznikat i nežádoucí plyny.
3. Koncentrační gradienty - Vznikají v důsledku změn místní koncentrace iontů způsobených difuzí a přemístováním iontů.
4. Aktivační energie - Aktivační energie je minimální energie potřebná ke vzniku elektrochemických reakcí.

Zavádějí se různé metody ve kterých jsou zahrnuty podrobné numerické simulace šíření generovaného tepla v bateriích z hlediska elektrochemických jevů. Další metody jsou zaměřené na určení vnitřního odporu, změny entropie a dalších parametrů, které jsou nutné k určení tepla generovaného z provozní charakteristiky baterie. Vyžadují podrobné informace o tvaru, velikosti, složení a fyzikálních vlastnostech všech součástí baterie. Tyto metody jsou tedy hlavně využívány odborníky na straně výrobců baterií. Mnohé přístupy dostatečně neuplatňují teorii elektrochemie, tím se zkreslí výsledek celého modelu. Avšak není potřeba znát přesnější informace o baterii a z jakých materiálů se skládá, v některých modelech je tohle klíčovým faktorem. Výhodou je tedy, že mohou být snadno aplikovány na skutečné baterie odborníky na uživatelské straně. Kromě toho lze modely vybrat s ohledem na naměřené výsledky provozních vlastností baterie a můžeme dosáhnout dostatečné přesnosti i za použití jednoduchého modelu. Tyto výhody zdaleka převažují zmíněný nedostatek. Výsledky by se ale měly pokaždé porovnat s experimentálními daty. [29]

4.1 Elektrochemicko-tepelný model

Tepelné modely využívají energetickou bilanci pro výpočet tepla. Obecný vzorec pro energetickou bilanci je následující:

$$Q_{gen} = Q_{ztr} - Q_{vnt} \quad (4.2)$$

Kde Q_{gen} je teplo generované v důsledku různých mechanismů, Q_{ztr} je teplo odváděné z baterie do okolního prostředí a Q_{vnt} je přenesené teplo uvnitř bateriového systému např. mezi elektrodou a elektrolytem nebo přímo uvnitř elektrod. K přenosu tepla dochází vedením, prouděním a zářením.

Vedení tepla (konduktce)

Sdílení tepla se projevuje především v pevných částech baterie, a to zejména na elektrodách, proudových kolektorech a plášti. Velikost tepelného toku je definována Fourierovým zákonem:

$$dq = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4.3)$$

Hodnoty tepelné vodivosti se liší u různých materiálu, které jsou použity pro jednotlivé části baterie. Proudové kolektory jsou většinou vyrobeny z kovů jako je měď nebo hliník, a u nich je tepelná vodivost vysoká, což zaručuje účinný přenos tepla. Zatímco u materiálu, které jsou použity na výrobu elektrod, je tepelná vodivost nižší.

Proudění tepla (konvekce)

Přenos tepla probíhá především mezi povrchem baterie a okolní tekutinou (chladičím médium, vzduch). Vychází se z Newtonova ochlazovacího zákona, který spočívá v určení součinitele přestupu tepla. Za pomoci kriteriálních rovnice pro výpočet např. Reynoldsova (Re), Nusseltova (Nu) nebo Prandtlova (Pr) čísla viz rov. 4.5, 4.6, 4.4

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4.4)$$

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad (4.5)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (4.6)$$

V bateriích dochází k přirozené nebo nucené konvekci. Nucená konvekce zahrnuje použití vnějšího zdroje jako jsou čerpadla, ventilátory k vyvolání proudění a zvýšení přenosu tepla. Zatímco u přirozené konvekce není pohyb tekutiny ovlivněn vnějším zdrojem.

Záření (sálání)

Fyzikální podstatou radiace je vyzařování, pohlcování a šíření elektromagnetických vln. Vychází se z Stefan-Boltzmanova zákona (rov.4.7), který udává množství energie, které dokonale černé těleso o ploše 1 vysílá za jednotku času.

$$E_0 = \sigma T^4 \quad (4.7)$$

V bateriích dochází k přenosu tepla zářením v důsledku rozdílných teplot mezi povrchy baterie a okolním prostředím. [30] [31]

Elektrochemické reakce probíhající uvnitř baterie, jsou exotermického původu a vytvářejí teplo. Základními zdroji tepla v baterii jsou Ohmické ztráty, koncentrační gradienty a aktivační teplo.

V různých modelech jsou převzaty různé přístupy. Jedním z nejčastěji používaných je Newmanův model, který využívá parciální diferenciální rovnice k vyjádření zákona zachování hmoty, náboje a energie. Předpokládá homogenitu elektrolytu a zanedbává podrobné elektrochemické procesy na rozhraní elektrod a elektrolytu. Newmanův model nám poskytuje zdánlivě komplexní znázornění vzniku tepla, už ale přesně nezachycuje složité elektrochemické procesy. [32] Další modely, které vycházejí z Newmanova modelu už jsou značně vylepšené. Např. Doyle-Fuller-Newmanův (DFN) model zahrnuje další jevy jako je polarizace koncentrace. K tomuto jevu dochází na rozhraní elektrod a elektrolytu. Je charakterizována gradientem koncentrace v blízkosti povrchu elektrody. DFN model zohledňuje vznik tepla jak ohmickými ztráty, tak i koncentračními gradienty. [33]

Bernardi a spol. odvodili obecnou rovnici energetické bilance pro predikci vzniku tepla. Berou se v potaz směšování, fázové přeměny a souběžné elektrochemické reakce s potenciály otevřeného obvodu závislými na složení. S předpokladem, že teplota baterie je v celém rozsahu rovnoměrná. A určí se těmito procesy:

1. chemickými reakcemi
2. změny tepelné kapacity systému
3. fázovými změnami
4. směšováním
5. přenosem tepla s okolím
6. elektrickou prací

Přístup pro odhad vzniklého tepla Bernardim a spol. je nejčastěji používaná. Tento přístup lze snadno využít na malých lithium-iontových bateriích, za předpokladu že nedochází k tepelné výměně při směšování nebo fázové přeměně, prostorovému kolísání teploty nebo SOC. Přičemž na každé elektrodě probíhá pouze jedna elektrochemická reakce a Jouleovo teplo v proudových kolektorech je zanedbatelné. [34] Přístup místní produkce tepla je součtem všech relevantních místních tepelných

jevů, které se vyskytují uvnitř baterie. Patří mezi ně teplo generované na elektrochemickém rozhraní a v sypkém materiálu v různých částech článku. Zanedbává se fázová změna, koncentrační gradienty v elektrolytu a tepelné účinky z difúze lithia. Teplota článku je rovnoměrná po celém obvodu. Tepelné účinky zahrnují pouze Jouleovo teplo v separátoru a elektrolytu, matici v kladné porézní elektrodě a kinetický povrch na obou elektrodách.[19] [35]

4.2 Multi-fyzikální model

Jedná se o nejkompexnější model, který zohledňuje vícero fyzikálních jevů. Vychází se např. z rovnice vedení tepla nebo rovnice kontinuity. Včetně elektrochemických reakcí, přenosu tepla a mechanického namáhání. Dokáže předvídat výkon a bezpečnost baterií za různých provozních podmínek. Model může také předpovídat např. nárůst teploty, mechanickou deformaci nebo rychlost elektrochemických reakcí během nabíjení a vybíjení. Umí také určit riziko vzniku tepelného lavinového jevu a úbytku kapacity baterie. Mezi prvními, kteří přišli s multi-fyzikálním modelem byla skupina pana Newmana. [36] Při srovnání modelu p. Newmana s experimentálními daty se ukázaly rozpory. Jedním z důvodů byl nedostatek přesných informací o vlastnosti materiálu, a odhady, které byly při modelování použity. Ale s úpravami se kterými přišel p. Nazarik a p. Farhad, dokázali tento přístup vylepšit. [37]

4.3 Model vzniku tepla v důsledku změny entropie

Entropie je základní termodynamická veličina, která definuje míru neuspořádanosti systému. Tento model je založený na druhém termodynamickém zákonu a zohledňuje nevratné procesy, které probíhají uvnitř baterie. Během nabíjecích a vybíjecích cyklů dochází k pohybu nosičů nábojů, jako jsou ionty nebo elektrony. Tento pohyb vede ke změnám v prostorovém rozmístění nosičů a jejich energetických stavů, a to vede ke změně entropie. Změnu entropie lze vyjádřit takto:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (4.8)$$

Při nabíjení/vybíjení dochází k vzniku vratných a nevratných procesů. Vratné procesy probíhají bez jakéhokoliv úniku energie. Při přeměně chemické energie na elektrickou při vratném ději, se elektrická energie rovná Gibbsově energii. Zatímco při nevratných procesech dochází ke ztrátám energie ve formě tepla. Elektrická energie v tomto případě je menší než Gibbsova energie a ta je přeměněna na tepelnou energii. Při použití tohoto modelu, musíme zohlednit faktory, které vedou ke změně entropie během elektrochemických reakcí. Těmito faktory jsou teplota, kinetika reakcí a koncentrační gradienty. [38]

Teplota

Rozložení teplot lze popsat pomocí rovnic přenosů tepla. Teplota ovlivňuje tyto procesy:

1. Molekulární pohyb - S rostoucí teplotou roste i kinetická energie molekul. To vede k intenzivnějšímu pohybu molekul, což znamená větší neuspořádanost a náhodnost v systému.
2. Rychlost reakce - Dle Arrheinovy rovnice rychlost reakce exponenciálně roste s teplotou. V souvislosti s reakcemi v baterii je pohyb nosičů ovlivněn rychlostí reakce. Rychlejší reakční rychlost, která je dána vyšší teplotou, vede k rychlejšímu přenosu nábojů, což vede k větší změně entropie.

Kinetika reakcí

Kinetiku reakcí lze popsat pomocí Butler-Volmerovy rovnice. V kontextu elektrochemických reakcí, které probíhají uvnitř baterie, lze souvislost mezi kinetikou reakcí a změnou entropie vysvětlit pomocí pojmu aktivační energie. Aktivační energii lze chápat jako energii, která je potřebná pro přenos nosičů nábojů mezi elektrodami.

Koncentrační gradienty

Koncentrační gradienty jsou důležité při určování změny entropie. Při chemických reakcích, kdy reaktanty mezi sebou reagují, mohou mít výsledné produkty reakce jiné složení a koncentraci než původní stav. Změna entropie závisí na konkrétní reakci. [39] [40]

4.4 Model vzniku tepla v důsledku tepelného lavinového jevu

Pojem tepelný lavinový jev neboli thermal runaway je popsán na str. 27. Vznikající teplo lze modelovat ze dvou hledisek. Jedním z nich je, že se bude uvažovat teplo generované elektrochemickou reakcí během tepelného lavinového jevu. Potom teplo vznikající při elektrochemické reakci můžeme vyjádřit jako:

$$Q = ESR \cdot I^2 \cdot t \quad (4.9)$$

Kde Q je generované teplo, ESR je zdánlivý odpor, I je proud a t je doba trvání tepelného lavinového jevu. Druhé hledisko by bylo zohlednění tepla vznikající při exotermickém rozkladu elektrolytu. Teplo by se vyjádřilo následovně:

$$Q = m \cdot H \quad (4.10)$$

Kde Q je generované teplo, m je hmotnost rozkládajícího se elektrolytu a H je rozkladné teplo. [41] [42] [38]

4.5 Model vzniku tepla v důsledku vnitřního odporu

Vnitřní odpor vyjadřuje pokles napětí vlivem protékajícího proudu uvnitř baterie. Lze ho vyjádřit jako:

$$R_i = R_e + R_c + R_s + R_{se} \quad (4.11)$$

Kde R_e je odpor elektrolytu, R_c je kontaktní odpor, R_s je odpor sběračů proudu a R_{se} je odpor rozhraní elektrolytu a pevné látky.

Vnitřní odpor baterie generuje teplo, když jí protéká elektrický proud. Teplo, které se produkuje je vyjádřeno takto:

$$Q = I^2 \cdot R_i \quad (4.12)$$

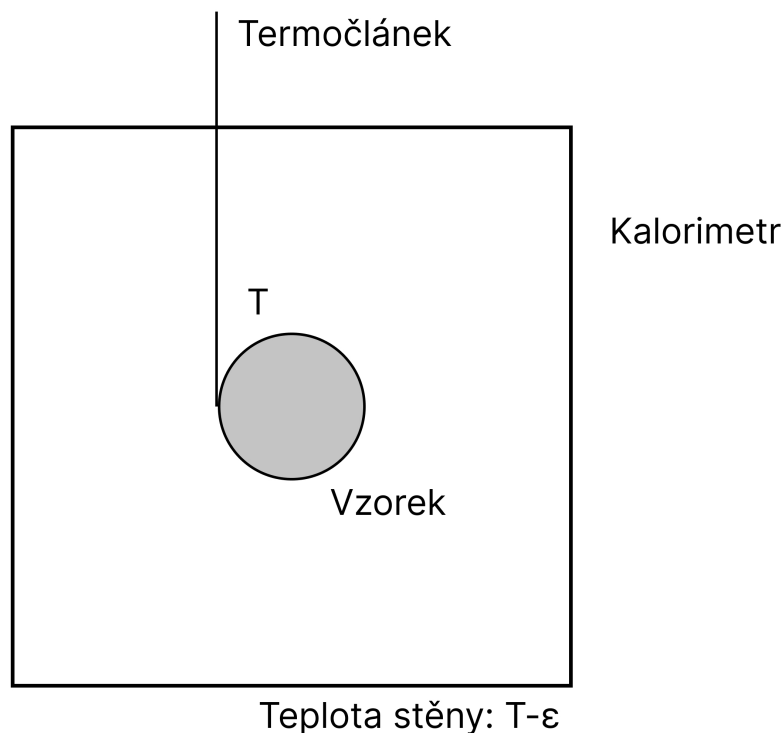
Teplo je tedy přímo úměrné druhé mocnině proudu. Vysoké hodnoty proudu při rychlém nabíjení a vybíjení, tak mohou vést k výrazné produkci tepla. [43]

4.6 Empirický model

Tyto modely jsou založeny na experimentálních datech získaných měřením teploty a generovaného tepla při různých podmínkách provozu. Na základě těchto dat jsou vytvořeny empirické vztahy mezi generovaným teplem a jinými faktory, jako je proud, napětí nebo doba provozu. Je to účinný model pro zjištění rozložení teploty v baterii. To je však považováno za příliš nákladné, časově náročné a v některých případech omezující. Při experimentálních měřeních se nejčastěji využívají termočlánky nebo kalorimetrie. Ta se dělí na dvě základní skupiny podle toho za jakých podmínek pracují, na adiabatická kalorimetrie (ARC - accelerating rate calorimetry) a izotermní (IHC - isothermal heat conduction calorimetry). [44]

ARC kalorimetrie

Termočlánek je připojen na vzorek, který je umístěn uvnitř kalorimetru. Řídící jednotka je naprogramována tak, aby se teplota kalorimetru zvýšila na počáteční teplotu T . Přestup a prostup tepla způsobují zvýšení teploty vzorku. Ve chvíli kdy se teplota vzorku přiblíží hodnotě T , tak se stěny udržují na teplotě $T - \varepsilon$, kde hodnota ε je velmi malá. Jelikož je tepelný tok od vzorku ke stěně úměrný k ε , tak je tepelný tok zanedbatelný a udržují se téměř adiabatické podmínky. Pokud na elektrodách probíhají chemické reakce, při nichž se generuje teplo, tak se teplota vzorku zvýší. Jakékoli zvýšení teploty ve vzorku bude odpovídat zvýšení teploty okolí. Pokud je rychlost samovolného ohřevu vyšší než dolní mezní hodnota $0,2^\circ\text{C}/\text{min}$, tak dochází k přechodu na exotermický režim a samovolné zahřívání je sledováno, dokud rychlost ohřevu neklesne pod danou hodnotu nebo dokud není dosaženo cílové teploty.



Obr. 4.1: Schéma ideálního adiabatického kalorimetru

Když je článek v procesu nabíjení/vybíjení, je míra generovaného tepla vypočtena podle následujícího vzorce:

$$Q = mc_p \frac{dT}{dt} \quad (4.13)$$

kde m je hmotnost článku, c_p je měrná tepelná kapacita a dT/dt je rychlost nárůstu teploty, která je měřena pomocí připojených termočlánků na povrchu baterie. [45]

IHC kalorimetrie

V izotermních kalorimetrech je veškeré uvolněné nebo spotřebované teplo odváděno, resp. převáděno a teplota během celého měření udržována konstantní. Odvedené teplo pak působí buď fázovou přeměnu čisté látky, nebo je kompenzováno elektricky (dotápěním Jouleovým teplem nebo chlazením pomocí Peltierova efektu apod.).

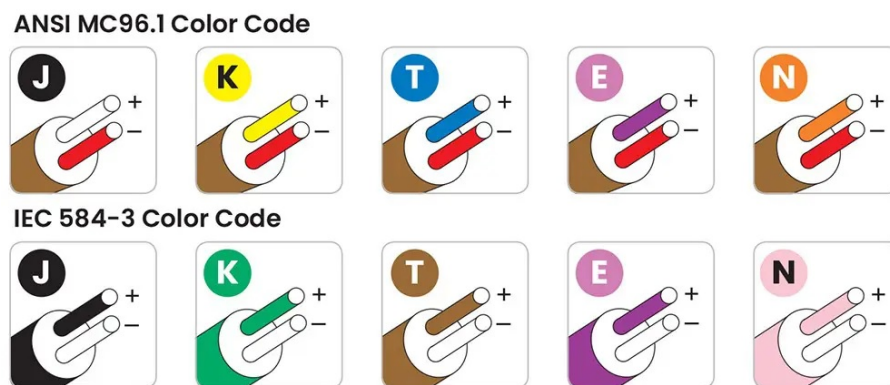
Izotermická kalorimetrie je metoda, která se zabývá měřením tepelného výkonu tj. rychlosti produkce tepla, rychlost ohřevu v závislosti na čase.

Při měření je vzorek obvykle umístěn v kalorimetru, který je navržen tak, aby minimalizoval tepelné ztráty do okolí. Ve většině případů je přidána tepelně izolační vrstva. Kalorimetr je umístěn v izotermickém prostředí a teplota vzorku je po celou dobu udržována konstantní. Tepelný tok se měří pomocí teplotního čidla, které bývá

nejčastěji termočlánek nebo odporový teploměr. Při reakci se uvolňuje teplo, což má za následek změnu teploty vzorku. Tuto změnu poté detekuje teplotní čidlo a zaznamenává veškerý vývoj teploty v závislosti na čase. [45]

Termočláanky

Termočláanky jsou teplotní čidla, které pracují na principu Seebeckova jevu a lze je připojit k povrchu baterie a přímo měřit teplotu. Skládá se ze dvou různých kovových drátů, které jsou spojené do měřícího spoje a připojené k přístroji měřící teplotu. Při vzniku teplotní difference mezi měřícím spojem a druhým koncem termočláanky, dochází ke vzniku kontinuálního proudu (rozdíl elektrických potenciálů) po celé délce termočláanky. Toto napětí lze následovně převést na údaj o teplotě. Každý typ kombinace kovů použitých v termočláanky má unikátní závislost mezi rozdílem teplot a generovaným napětím. Mezi nejběžnější termočláanky patří kategorie Base Metal, známé jako typy J, K, T, E a N. Pro vyšší teploty jsou používány termočláanky kategorie Noble Meta - R, S, C, G a B. [46]



Obr. 4.2: Barevné značení termočláanky dle americké ANSI a mezinárodní IEC normy [46]

Infračervená termografie

Pomocí infračervené kamery se měří teploty povrchu baterie. Každý objekt s povrchovou teplotou vyšší než 0 °C, bude produkovat elektromagnetické záření. Toto záření je charakterizováno dvěma veličinami a těmi jsou vlnová délka (λ) a intenzita (Q). Povrchová teplota souvisí s oběma veličinami. Jedná se o bezkontaktní techniku. Sledováním rozložení teploty v baterii lze odhalit místa s vyšší teplotou. [47][48]

5 Praktická část studentské práce

5.1 Experimentální měření

Následující měření zahrnuje plastový výměník tepla pro chlazení kapalinou. Výměník se skládá z polymerních dutých vláken o průměru 0.84 mm. Vlákná jsou umístěna v těle z polydicyklopentadienu¹ (PDCPD) vyrobeného reakčním vstřikováním² (RIM). Díky tomu je výměník velmi kompaktní, lehký, korozivzdorný, elektricky nevodivý a dlouhodobě odolný proti účinkům chemikálií. Do výměníku jsou uloženy články typu 18650, jehož parametry jsou v tab. 5.1

Model	US18650VTC5
Výrobce	Sony
Typ	18650
Nominální kapacita	2600 mAh
Nominální napětí	3.6 V
Přibližné rozměry	18.20 mm x 65 mm
Přibližná hmotnost	44.1 g

Tab. 5.1: Technické parametry baterie

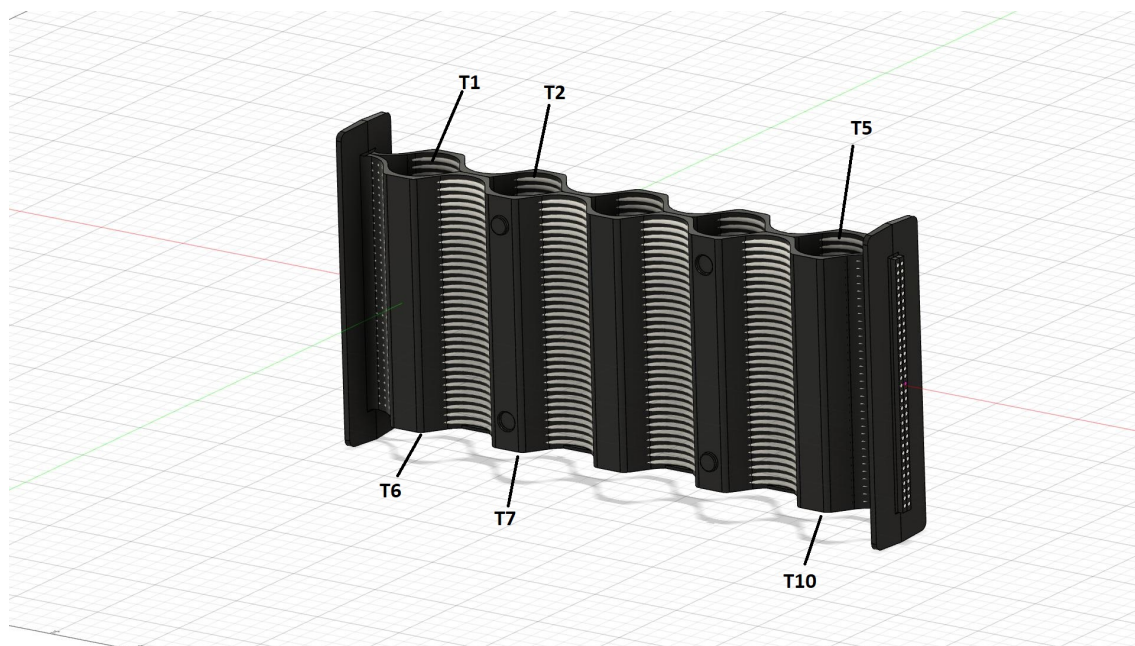
Celkem pět článků je zapojeno v sérii tak, aby elektrický proud, který prochází každým článkem, byl konstantní. Články jsou vloženy do výměníku a podrobeny počítačem řízeném cyklování při nabíjení/vybíjení. K tomuto účelu byl použit počítačový analyzátor baterií West Mountain Radio CBA IV spolu s 500 W zesilovačem a regulátorem nabíjení West Mountain Radio CBA. Li-ion články jsou jednotlivě nabíjeny mezi experimenty konstantním proudem 1.1 A (0,5 C-rate), aby se dosáhlo jejich plné kapacity a nepoužívaly se články s příliš odlišnou kapacitou. Ke katodě a anodě každého článku jsou přivařeny niklové pásy. Teploty jsou měřeny termočlánky typu K s průměrem drátu 0.25 mm, které jsou umístěny na svorkách v každém článku. Umístění je znázorněno na obr. 5.1. Termočlánky jsou elektricky izolovány od článků pomocí tenké plastové fólie, aby se zabránilo falešnému měření teploty. Teploty byly zaznamenány pomocí PhoenixTM PTM1020 dataloggeru každých 10

¹jedná se o polymer, který vzniká metatézou polymerací dicyklopentadienu (DCPD)

²jedná se o vstřikování kapalné směsi do utěsněné dutiny formy, kde proběhne polymerace materiálu (exotermická reakce a expanze) s vytvrzením složek

sekund. Celý výměník s články byl tepelně izolovaný v obalu z polyuretanové pěny (PU). Chladicím médiem byla destilovaná voda se vstupní teplotou 20 °C. Průtok byl regulovaný ventilem typu HAM-LET Group H-1300 a celkový průtok byl měřený průtokoměrem KROHNE VA40V/R.

Při jednotlivých experimentech se uvažoval konstantní vybíjecí proud o 5 A (2,27 C-rate), 10 A (4,55 C-rate) a 15 A (6,82 C-rate). Průtok chladicí kapaliny byl také konstantní a uvažovaly se hodnoty od 0.3 do 10 l/h.



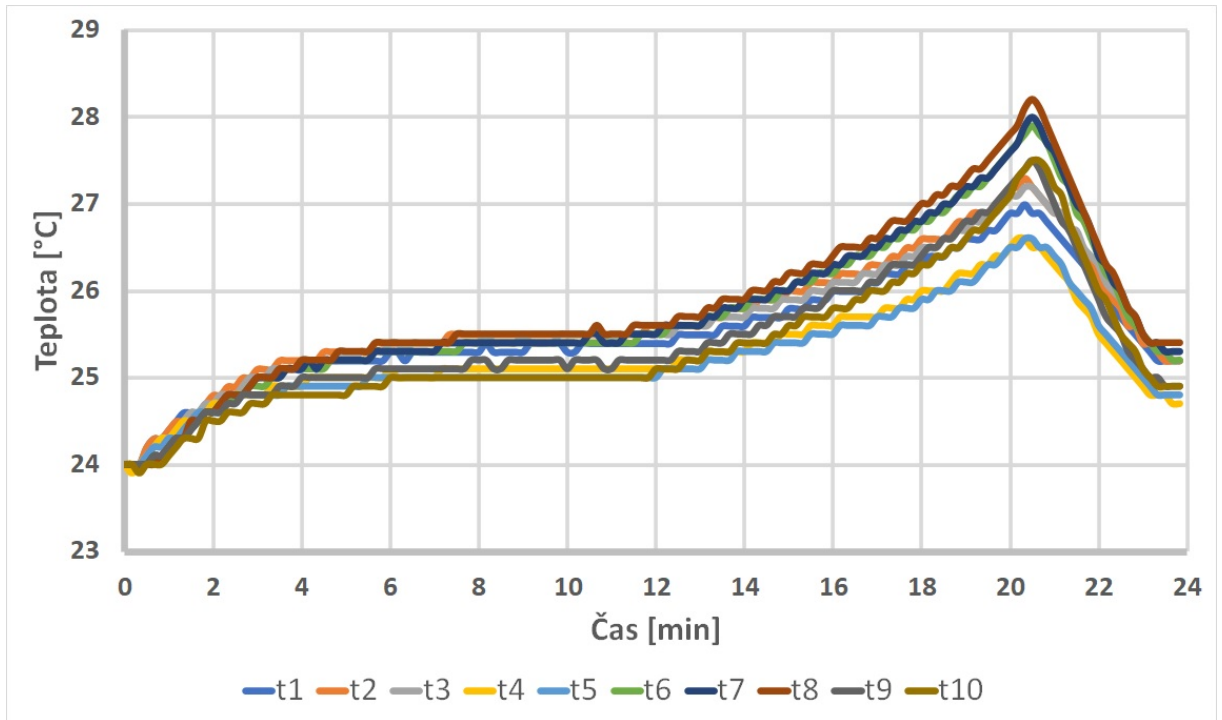
Obr. 5.1: Rozmístění jednotlivých termočlánků

5.1.1 Výsledky měření

S postupným navyšováním vybíjecího proudu se teplota zvyšovala a přesáhla hranici 40 °C pouze v jednom případě, a to při 4,55 C-rate a průtoku 0.5 l/h. Při navýšení průtoku chladicího média se teplota dostane na 38.4 °C. Z obr.5.2 je zřejmé, že naměřené teploty nejsou rovnoměrně rozloženy ve všech měřených oblastech. Nejvyšší teploty se vždy naměřily na termočláncích t6 až t8 pro všechny případy vybíjecích proudů. Celkový čas vybíjecího cyklu se snižoval s rostoucím proudem. Při 5 A vybíjecí cyklus probíhal do cca 20 minut, při 7.5 A do cca 13 minut, při 10 A do cca 9 minut a u 15 A bylo vybíjení do cca 5 minut.

Při měření tlakové ztráty hodnoty kolísaly mezi 50 a 800 Pa. Ztráta je přímo úměrná velikosti průtoku chladicí kapaliny.

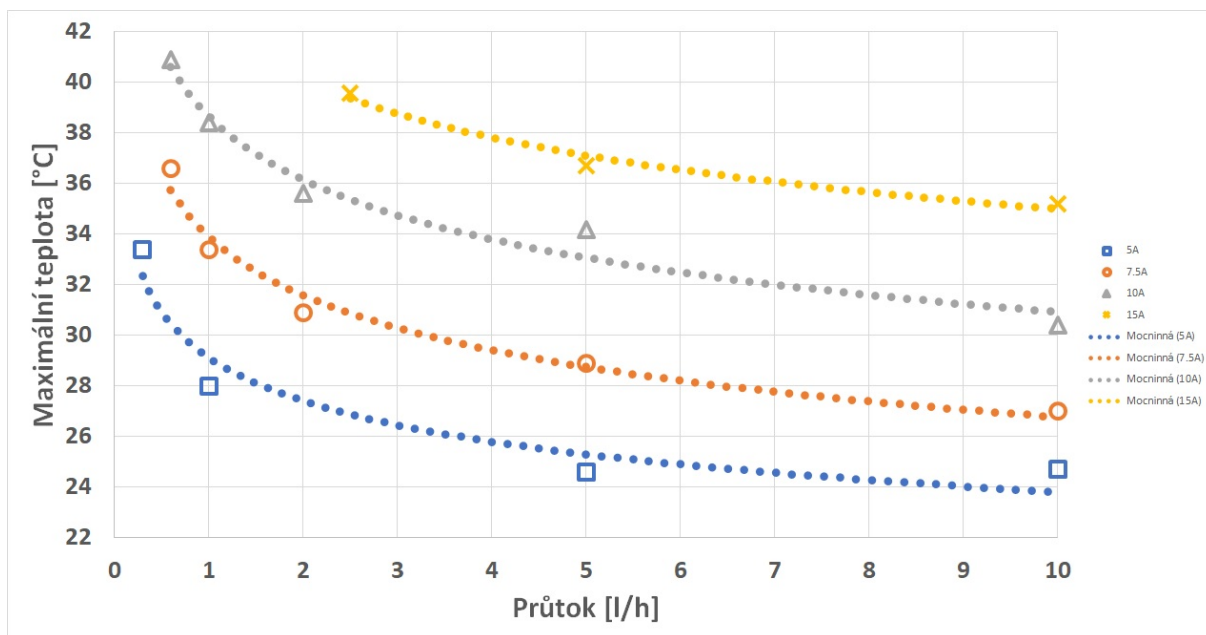
Vybíjení při 2,27 C-rate a průtoku 5 l/hod



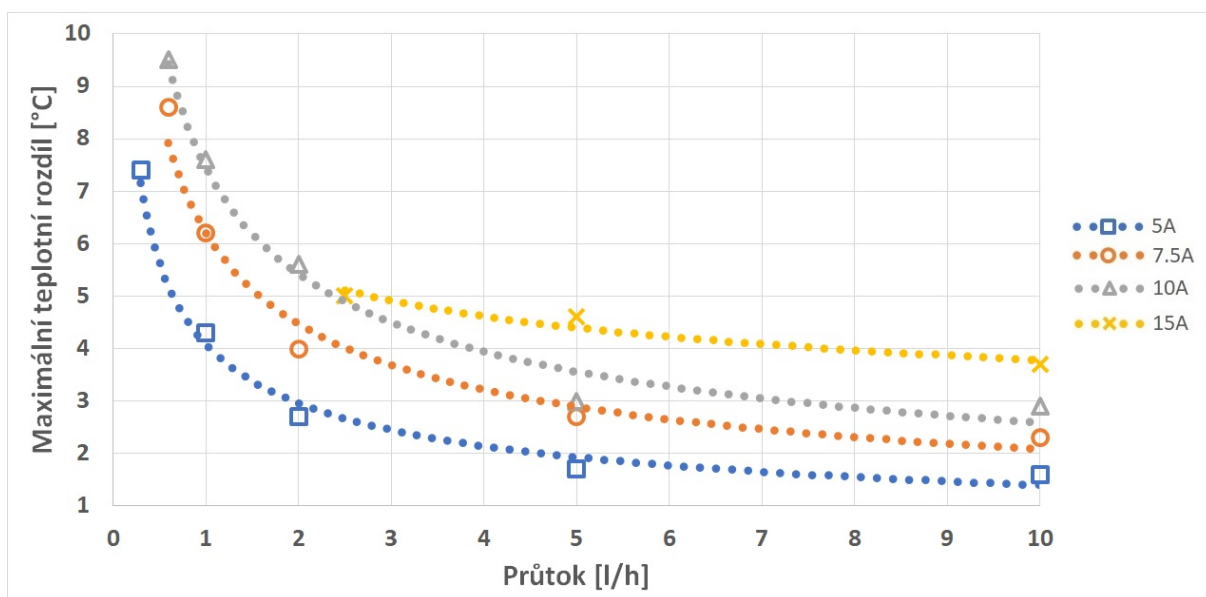
Obr. 5.2: Průběh teplot při průtoku 5 l/hod a vybíjecím proudem 5 A

Závislost maximální teploty (obr.5.3) a maximálního teplotního rozdílu (obr.5.4) na průtoku chladicí kapaliny je vyobrazeno proložení mocninné funkce naměřenými daty pomocí metody nejmenších čtverců. Pro zhodnocení kvality proložení je použit koeficient determinace R^2 , který byl v našich případech vždy větší než 0,94.

Oba parametry mají klesající tendenci při zvýšení průtoku chladicí kapaliny a při snížení vybíjecího proudu. Maximální tep. difference pro velmi nízké průtoky se pohybuje mezi 7 až 9.5 °C, což je nežádoucí. Při zvýšení průtoku na 2l/h se teplotní rozdíl ve většině případů dostane pod 5 °C, a to už můžeme považovat za akceptovatelný výsledek. Optimální provozní teplota je v rozmezí 20-40 °C a teplotní rozdíl by měl být menší než 5 °C. [49] Průtok by se měl udržovat mezi 2 a 5l/h pro dostatečné chlazení baterií. Další navyšování průtoku od 5l/h už má minimální účinek na teplotu. Musíme také brát v potaz, že v provozu jsou bateriové moduly řazeny vedle sebe, což by mělo značně ovlivnit reálnou teplotu.



Obr. 5.3: Závislost maximální teploty na průtoku chladící kapaliny



Obr. 5.4: Závislost maximálního rozdílu teplot na průtoku chladící kapaliny

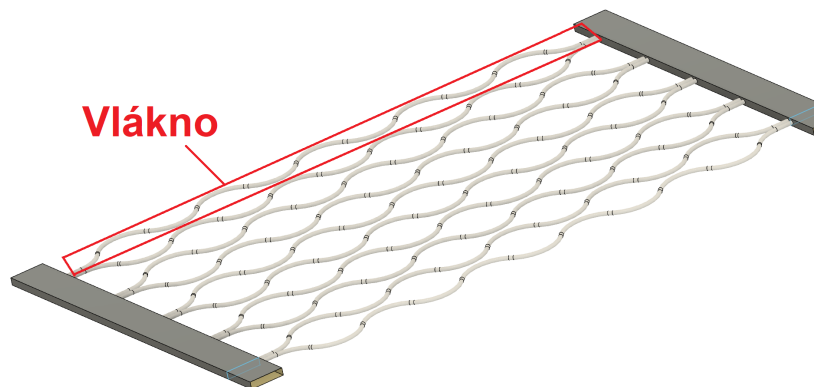
5.2 CFD simulace

Cílem je zmapovat rozložení průtoků přes jednotlivé paralelní větve výměníku s pomocí CFD výpočtu. K provedení numerických výpočtů byl využit volně dostupný software OpenFoam v2212 s využitím síťovacího nástroje snappyHexMesh.

5.2.1 Geometrie

3D model zjednodušené varianty byl vytvořen za pomoci programu SALOME verze 9.9.0. Zjednodušení modelu nám pomůže zkrátit čas při generování výpočetní sítě i při samotném výpočtu.

Chladič se skládá z 10 vláken a vstupního bloku o rozměru 10x2.1 mm. V původní větvi je celkem 33 vláken.



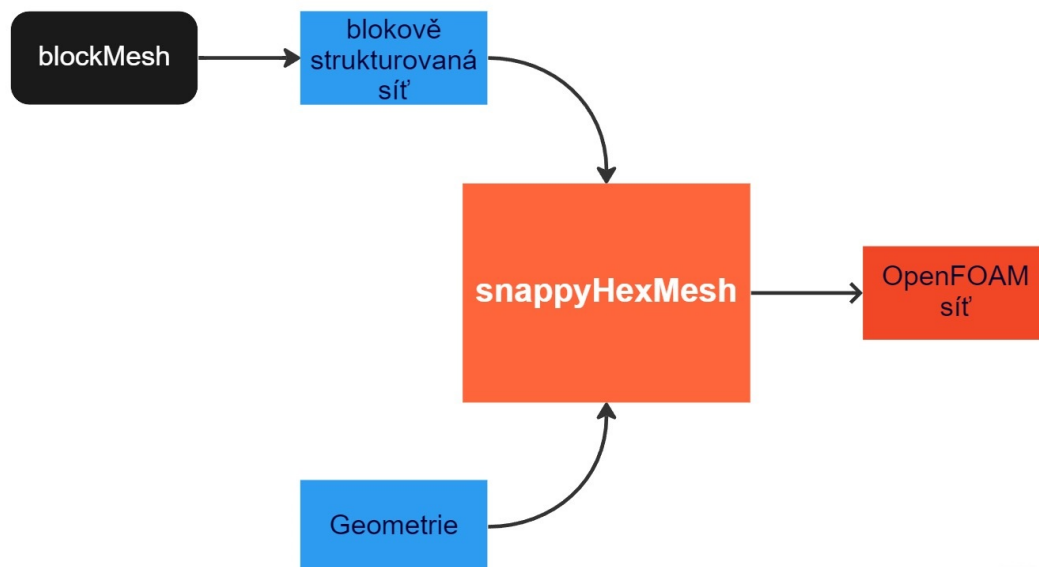
Obr. 5.5: Zjednodušený model

5.2.2 Výpočetní síť

Síť byla vytvořena za pomoci síťovacích nástrojů blockMesh a snappyHexMesh, které jsou součástí OpenFoamu.

Při generování finální sítě pomocí snappyHexMesh postupujeme podle obr.5.6

1. Generování blokově strukturované sítě
2. Vložení geometrie
3. Generování kastelované nebo kartézské sítě
4. Vytvoření přichycené sítě nebo přizpůsobené sítě objektu
5. Přidání vrstev v blízkosti povrchů nebo síťování mezních vrstev
6. Kontrola finální struktury sítě



Obr. 5.6: Postup při tvorbě sítě

blockMesh

Textový soubor pro tvorbu základní strukturované sítě se nazývá blockMeshDict. Síť se vytvoří spojením jednotlivých bodů v prostoru, tím se vytvoří útvar a poté se nadefinuje, kolik buněk se bude v daném útvaru nacházet, respektive v jednotlivých osách x,y,z. Základní jednotkou pro výpočet numerické simulace je metr, proto v každém souboru musí být zadáno, v jakém měřítku jsou vzdálenosti daných bodů. V našem případě se musí jednotky převést pomocí příkazu scale.

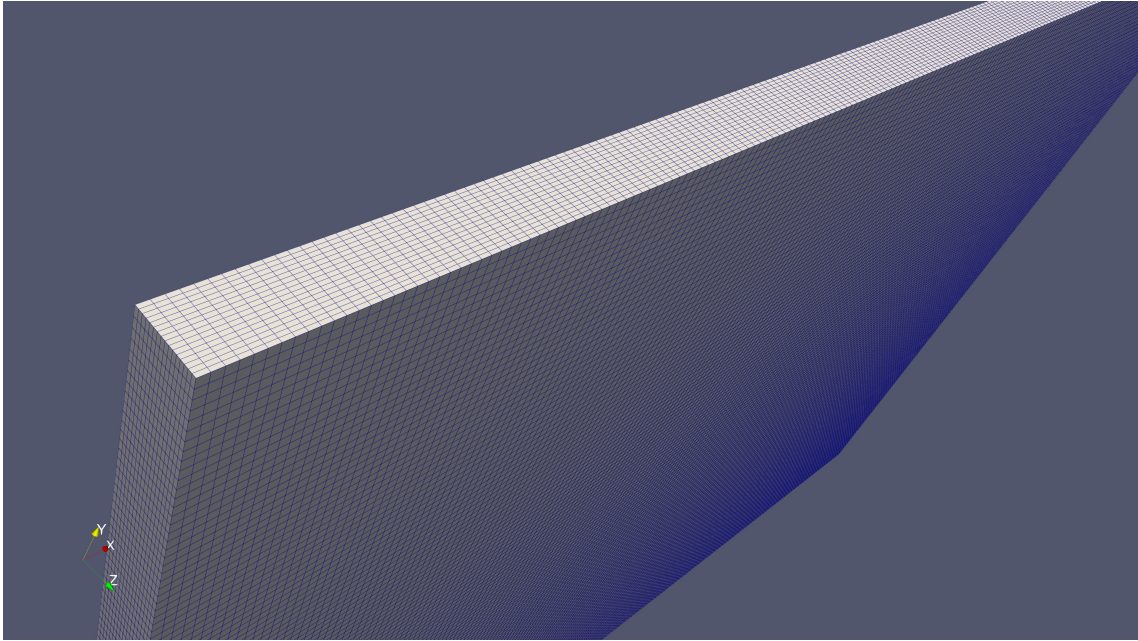
Tuto pomocnou síť lze vytvořit i v externím programu, který podporuje meshing.

```

blockMeshDict

scale 0.001;

vertices
(
  ( -6 -11 -2 ) //bod 0
  ( 180 -11 -2 ) //bod 1
  ( 180 122 -2 ) //bod 2
  ( -6 122 -2 ) //bod 3
  ( -6 -11 4 ) //bod 4
  ( 180 -11 4 ) //bod 5
  ( 180 122 4 ) //bod 6
  ( -6 122 4 ) //bod 7
);
  
```

Obr. 5.7: blockMesh

snappyHexMesh

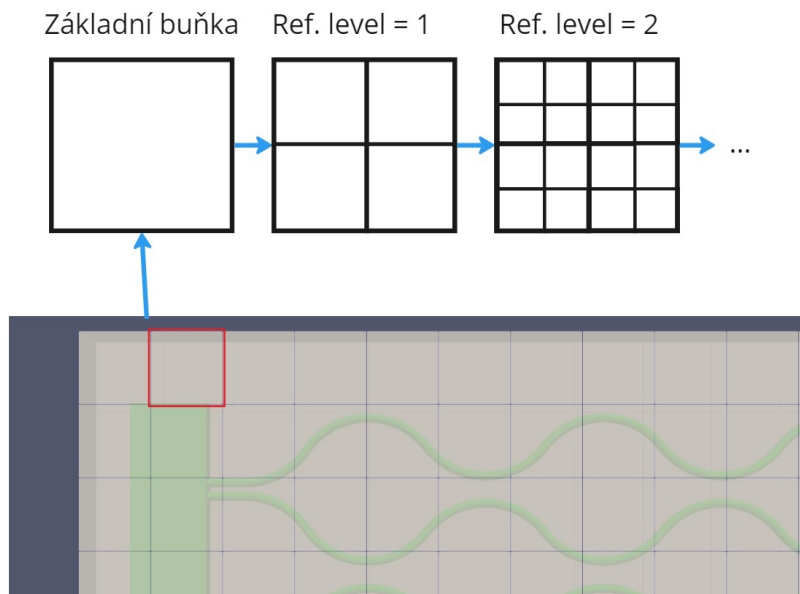
Geometrie se vkládá ve formátu STL a může být tvořena jediným povrchem nebo více povrchy, které popisují geometrii. V případě souboru s více povrchy můžeme použít místní zjemnění na konkrétním povrchu. To nám dává větší kontrolu při generování sítě.

snappyHexMeshDict

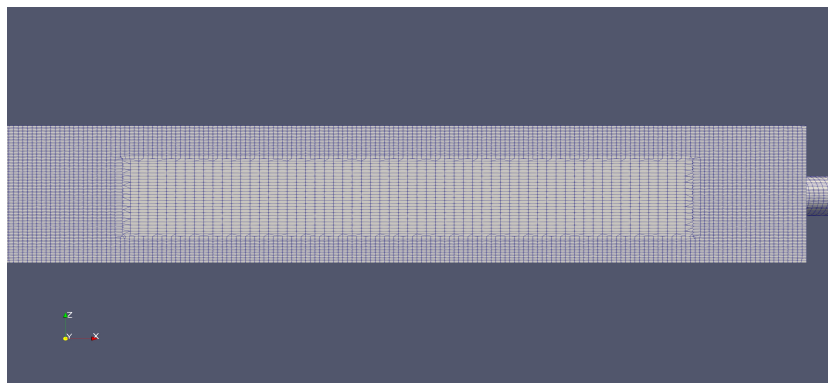
```
geometry
{
    chladic.stl
    {
        type triSurfaceMesh;
        regions
        {
            inlet          { name inlet; }
            wall_1         { name wall_1; }
            wall_2         { name wall_2; }
            outlet        { name outlet; }
        }
    }
};
```

Při zpřesňování objemu a povrchu se definuje refinement level, který udává jak moc chceme síť zjemnit viz.5.8

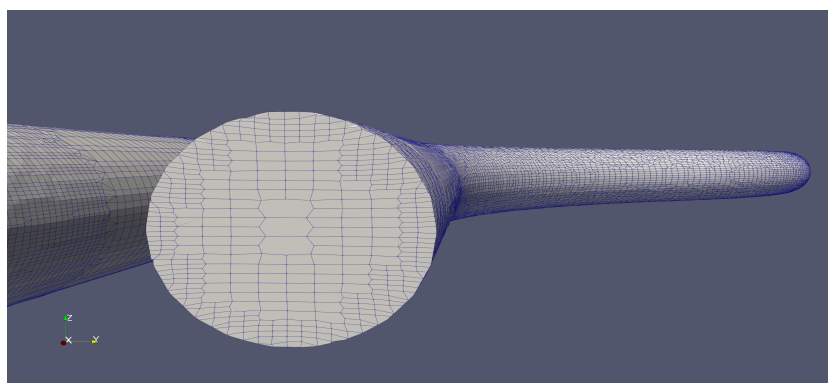
Následně se zadají různé parametry a funkce pro síťování a celkovou kvalitu.



Obr. 5.8: Refinement level



(a) vstup/výstup



(b) vlákno

Obr. 5.9: Finální síť

5.2.3 Kontrola výsledné sítě

Vygenerovaná síť se zkontroluje v OpenFOAMu pomocí nástroje checkMesh. Analyzuje a vyhodnotí nám kvalitu sítě. Záznam z výpisu obsahuje následující informace:

- Statistika počtu bodů, ploch, buněk atd.
- Celkový počet buněk jednotlivých typů
- Kontrola topologie a statistiky
- Kontrola topologie segmentů a statistiky
- Kontrola geometrie a parametrů kvality

Pro nás je nejdůležitější poslední bod.

```
checkMesh
Checking geometry...
Overall domain bounding box (0 -7.80061e-07 -1.43935e-07) (0.187258 0.113 0.00210511)
Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (-7.04588e-17 5.41743e-19 1.23904e-14) OK.
Max cell openness = 3.68794e-16 OK.
Max aspect ratio = 19.7532 OK.
Minimum face area = 2.45728e-10. Maximum face area = 2.41933e-07. Face area magnitudes OK.
Min volume = 9.997e-15. Max volume = 4.5932e-11. Total volume = 6.86321e-06. Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 65.0213 average: 14.258
Non-orthogonality check OK.
Face pyramids OK.
Max skewness = 4.3631 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.

Mesh OK.
```

Neortogonalita je velmi důležitým parametrem kvality. Hodnoty < 70 jsou bezpečné. v rozmezí $70 - 90$ jsou potřeba udělat úpravy v knihovně fvSolutions nastavením parametru nonOrthoCorrectors nebo změnou numerických schémat v knihovně fvSchemes. Hodnoty větší než 90 jsou považovány za velmi špatné a síť by se neměla dále použít k simulaci. Dalším významným parametrem je zkosení neboli skewness. Vyšší hodnoty mohou mít vliv na přesnost výsledků, nicméně pro simulaci lze použít hodnoty < 20 .

5.2.4 Nastavení okrajových a počátečních podmínek

Už při tvorbě geometrie jsme si stanovili plochy a jejich názvy, které se po vygenerování sítě přenesou do knihovny polyMesh a boundary.

```
boundary
4
(
    inlet
    {
        type            patch;
        nFaces          1738;
        startFace       8634660;
    }
    wall_1
    {
        type            wall;
        inGroups        1(wall);
        nFaces          142976;
        startFace       8637712;
    }
    wall_2
    {
        type            wall;
        inGroups        1(wall);
        nFaces          785514;
        startFace       8780688;
    }
    outlet
    {
        type            patch;
        nFaces          1314;
        startFace       8636398;
    }
)
}
```

Názvy jednotlivých částí v souboru boundary musí být identické jako v souborech počátečních podmínek rychlosti (U), tlaku (p) atd. Jednotlivým oblastem přiřazujeme požadované vlastnosti podle typu problému.

```
U
dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField    uniform (0 0 0);
boundaryField
{
    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform (0 -0.021 0);
    }
    wall_1
    {
        type            noSlip;
    }
    wall_2
    {
        type            noSlip;
    }
    outlet
    {
        type            zeroGradient;
    }
}
}
```

Na vstupu je nastavena rovnoměrná rychlost proudící kapaliny a nulový tlakový spád. Při výpočtu rychlosti jsme celkový průtok převedli na průtok jedním vláknem.

Následně se jednotky převedly na (m^3/s) a vydělily obsahem vlákna. Pro případ 2 l/h se rychlost rovnala 0.0084 m/s a pro 5 l/h byla rychlost 0.021 m/s. Na výstupu je nastavena fixní hodnota tlaku a nulový rychlostní gradient. Na stěně byla zadána okrajová podmínka noSlip a nulový tlakový gradient.

Výběr vhodného modelu turbulence je zásadní pro přesnou interpretaci proudění uvnitř systému. V důsledku malých rychlostí jsme zvolili laminární typ proudění.

5.2.5 Numerická schémata a řešič

Knihovna fvSchemes označuje diskretizační techniky, které se používají k aproximaci parciálních diferenciálních rovnic, kterými se řídíme při proudění tekutin. Nastavení schémat určuje způsob výpočtu prostorových gradientů a interpolace proměnných jako je rychlost, tlak a teplota. Různá schémata jsou přizpůsobena konkrétním podmínkám proudění.

Při využití algoritmu SIMPLE u stacionárního řešení je zachováno výchozí nastavení u většiny schémat. Tedy u ddtSchemes je nastavení steadyState, který časově závislé členy v modelu neuvažuje. Pro výpočet gradientů je zvoleno Gaussovo diskretizační schéma druhého řádu s interpolací hodnot druhého řádu typu *linear*. Pro výpočet divergencí se využívá Gaussovo diskretizační schéma, v našem případě prvního řádu upwind, které je jedno z nejčastěji používaných a nejefektivnějších schémat. Nevýhodou může být nepřesnost v oblasti s extrémními gradienty nebo složitějším prouděním. laplacianSchemes označují schémata pro výpočet a diskretizaci Laplaceovy rovnice nebo podobných difúzních rovnic. Typický zápis je následující *Gauss <interpolationScheme> <snGradScheme>*. *linear* je výchozím nastavením interpolačních schémat, nastavení *corrected* poskytuje neomezené, konzervativní chování tohoto členu, které uvažuje vliv třecích sil. [50]

fvSchemes

```
ddtSchemes
{
    default          steadyState;
}

gradSchemes
{
    default          Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default          none;
    div(phi,U)      Gauss upwind;
    div(nonlinearStress) Gauss linear;
    div((nuEff*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default          Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default          linear;
}

snGradSchemes
{
    default          corrected;
}

wallDist
{
    method          meshWave;
}
```

Klíčovým prvkem, který má zásadní vliv na simulaci proudění tekutin a dalších fyzikálních procesů, je knihovna `fvSolution`. Ten má na starosti regulaci používání technik numerického řešení ve výpočetní doméně. Můžeme si přizpůsobit proces řešení svým požadavkům díky rozsáhlým parametrům a možnostem. Umožňuje volbu numerických technik pro diskretizaci řídicích rovnic, jako je například spojování tlaku a rychlosti, difúze a advekční schémata. Řešení bylo považováno za plně konvergované, když součet reziduí byl nižší než 10^{-6} .

fvSolution

```
solvers
{
  p
  {
    solver          GAMG;
    tolerance       1e-08;
    relTol          0.1;
    smoother        GaussSeidel;
  }
  Phi
  {
    $p;
  }
  "(U|k|epsilon|omega|f|v2)"
  {
    solver          smoothSolver;
    smoother        symGaussSeidel;
    tolerance       1e-08;
    relTol          0.1;
  }
}

SIMPLE
{
  nNonOrthogonalCorrectors 1;
  consistent               yes;

  residualControl
  {
    p          1e-6;
    U          1e-6;
    "(k|epsilon|omega|f|v2)" 1e-3;
  }
}

relaxationFactors
{
  equations
  {
    U          0.8;
    ".*"      0.7;
  }
}
```

5.2.6 Výsledky simulace

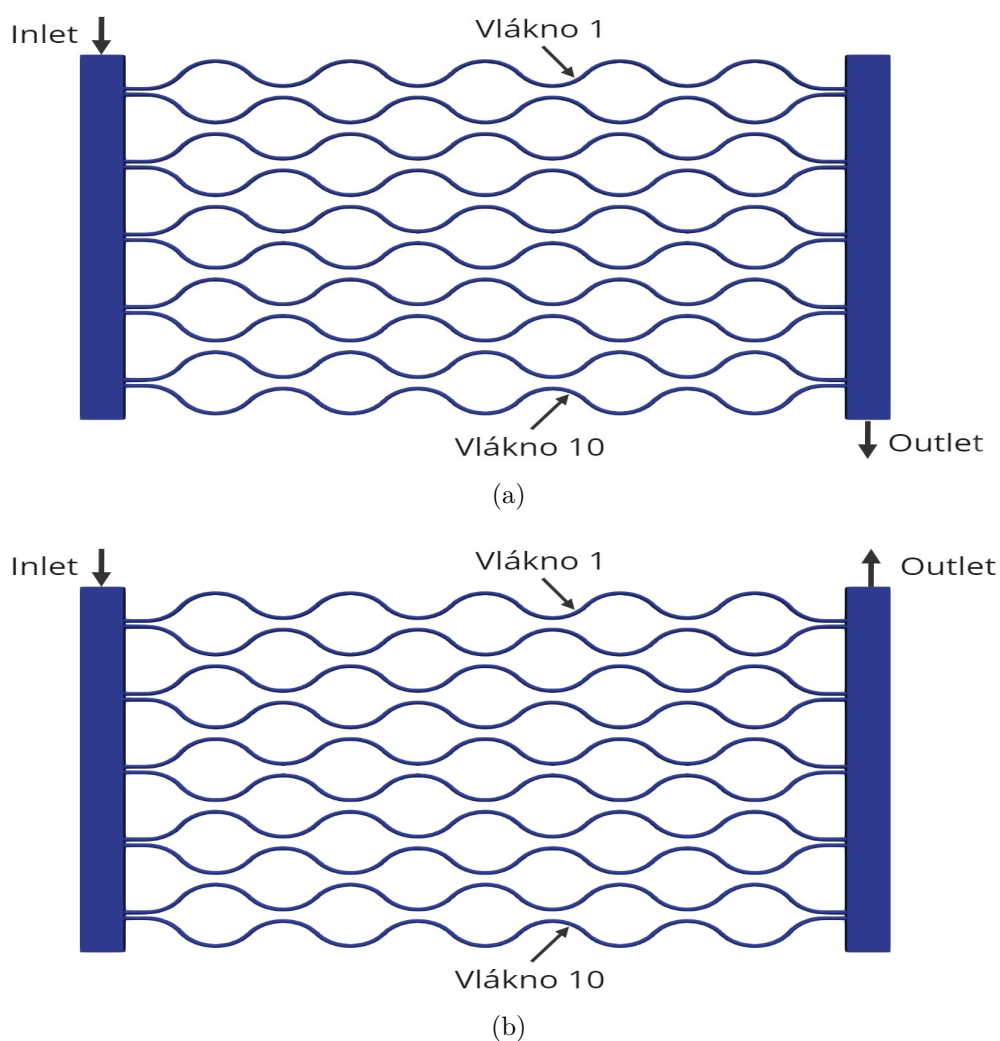
Vyhodnocení rozložení průtoků

Na následný post-processing byl použitý program ParaView v5.11.0. Pro vyhodnocení rozložení průtoků v jednotlivých větvích výměníku jsme zavedli parametr známý jako míra nestejnoměrného rozložení (MNR), který se vypočítá následovně:

$$MNR_i = \left(\frac{\dot{m}_i - \dot{m}_{prum}}{\dot{m}_{prum}} \right) \cdot 100 \quad (5.1)$$

$$\dot{m}_{prum} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i}{n} \quad (5.2)$$

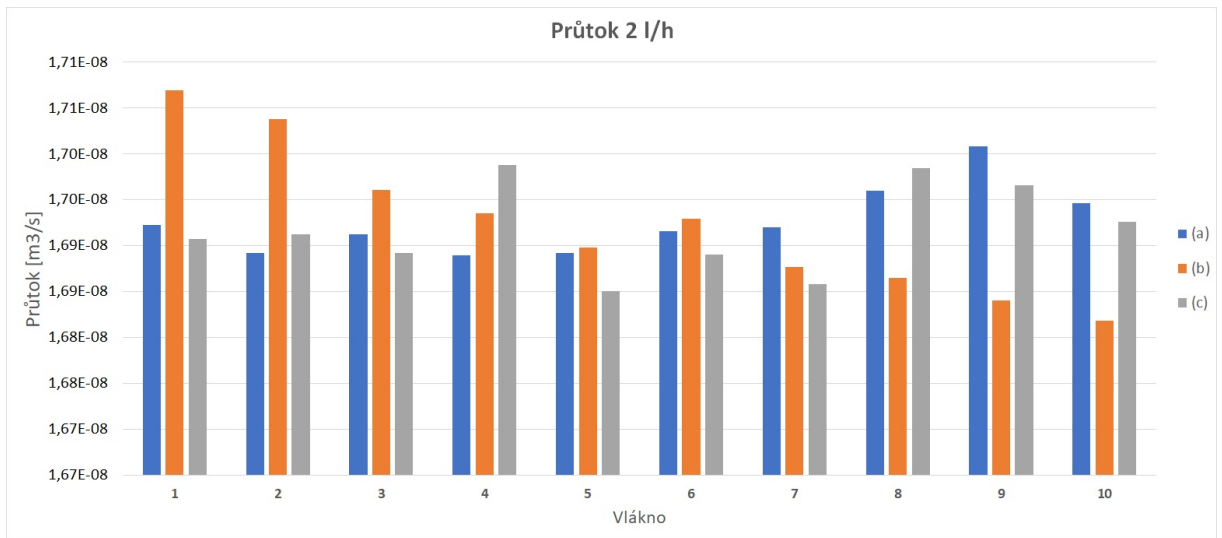
,kde \dot{m}_i je průtok přes i -tou větev výměníku a n je celkový počet paralelních vláken.



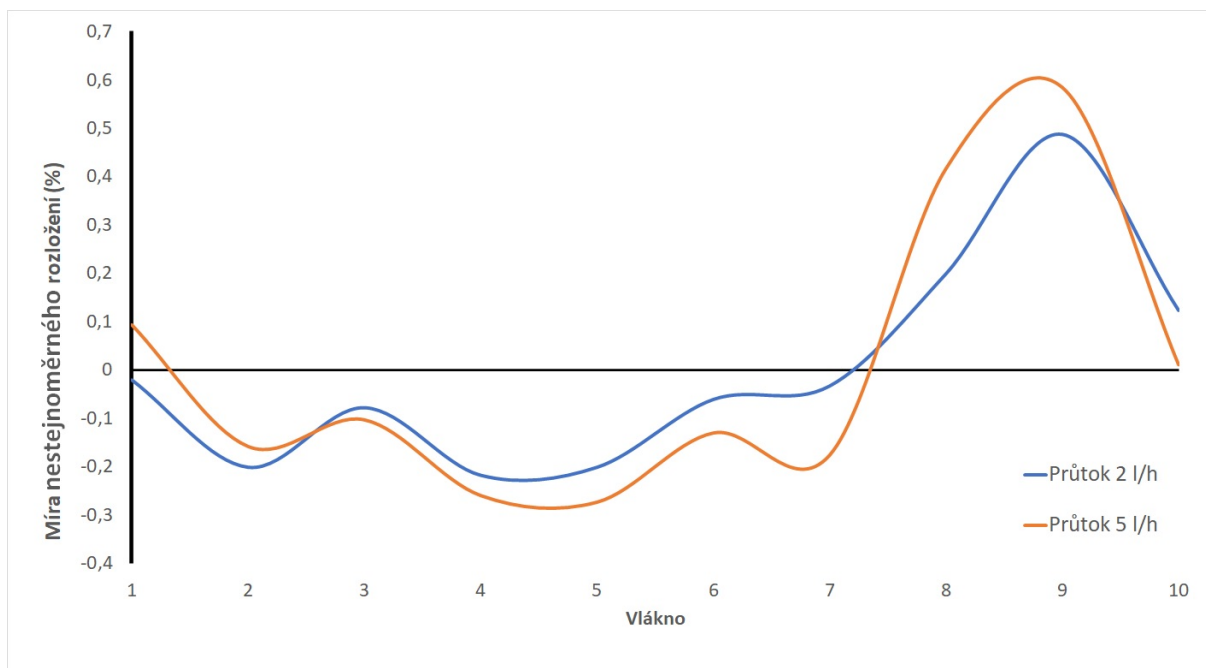
Obr. 5.10: Odlišné provedení vstupu a výstupu média

Výpočet byl proveden pro dvě varianty, které jsou zobrazeny na obr.5.10 (a) vstup a výstup média na odlišných stranách (b) vstup a výstup média na stejné straně.

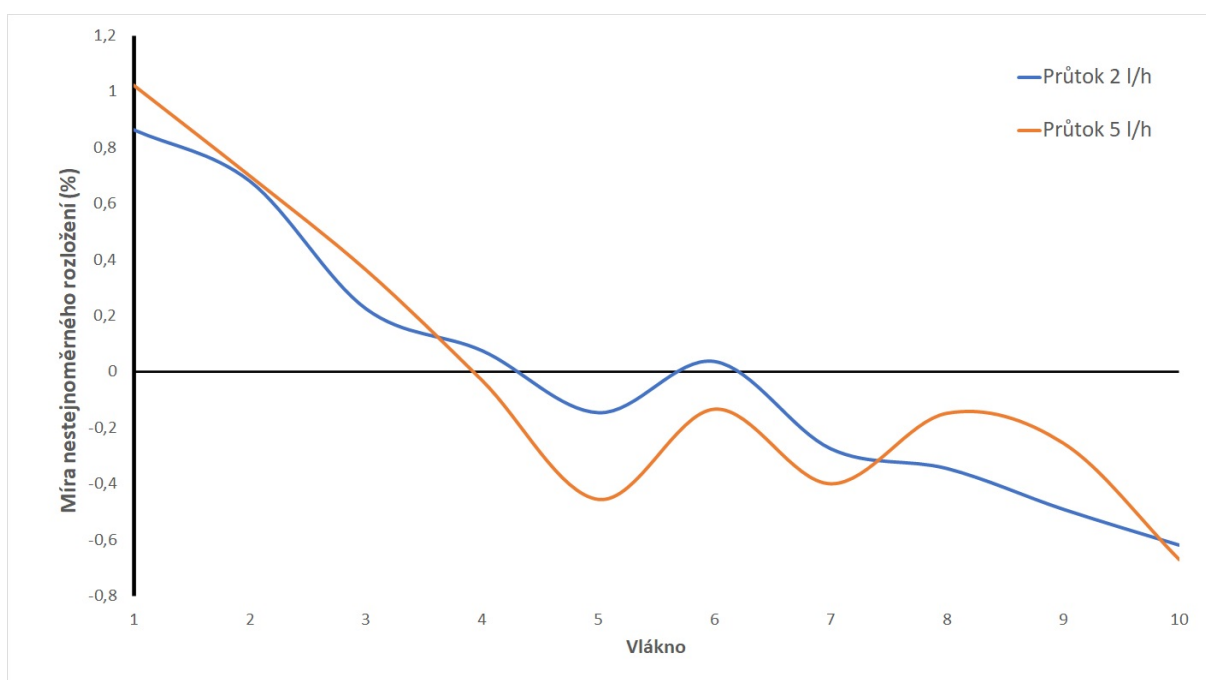
U první varianty obr.5.10(a) byl průtok zdánlivě rovnoměrně rozložený ve větvích 1 až 7 a následně došlo k mírnému vzestupu. Z charakteristiky MNR z obr.5.12 je maximální míra nesteromerného rozložení 0.5 ve vlákne 9, což můžeme označit jako vysoce rovnoměrné rozložení průtoku. S dvojnásobnou rychlostí se nám MNR zvýšilo pouze o 0.1. U návrhu vstup a výstup kapaliny na stejné straně obr.5.10(b) je největší průtok první větví, a postupně se průtok v dalších větvích snižuje. U tohoto provedení je MNR podstatně větší, kdy MNR_{max} dosahuje hodnoty 0.9 s větším průtokem bylo navýšení MNR stejné jako ve variantě (a) cca o 0.1.



Obr. 5.11: Rozložení průtoků v jednotlivých větvích



Obr. 5.12: Míra nesterjnoměrného rozložení průtoku ve vláknech pro variantu (a)



Obr. 5.13: Míra nesterjnoměrného rozložení průtoku ve vláknech pro variantu (b)

Zahrnutí hydrodynamických odporových profilů

V předchozích simulacích byl průměr všech vláken neměnný, toto se dá považovat za ideální stav. Ale ve skutečnosti nejdu vyrobít všechna vlákna se stejnými paramet-

try. V obr.5.14 je změřena proměnlivost velikosti vláken. Větve s menším průměrem vykazují obvykle vyšší hydrodynamický odpor, který při proudění způsobuje zvýšenou ztrátu energie a snížení tlaku a rychlosti tekutiny. To má samozřejmě vliv na samotný průtok ve větvi výměníku. Větve s vyšším hydrodynamickým odporem budou mít menší průtok, zatímco větve s nižším odporem budou mít průtok větší. Vlákná, která mají odchylku větší než 0.2 mm, jsme do našeho numerického modelu nezapočítali a můžeme říct, že se jedná o anomálii. Tato vlákna by se měla vyřadit jako zmetky.

Z histogramu 5.15 je patrné, že křivka četnosti je podobná Gaussově křivce, a proto jsme zvolili normální rozdělení (Gaussovo rozdělení). Pomocí funkce s datasetem pravděpodobnostní distribuce se zadanými parametry z měření byly pro jednotlivé větve vygenerovány jednotlivé hodnoty pro stochastický model. viz. příložený zdrojový kód níže 5.2.6 napsaný v programovacím jazyce python. Hodnoty pravděpodobnosti byly získány normalizací četností³ jednotlivých hodnot.

```
python
import numpy as np

# Definice hodnot a přiřazené pravděpodobnosti jako pole numpy
hodnoty = np.array(["hodnoty"])
pravdepodobnosti = np.array(["hodnoty pravdepodobnosti"])

# Kontrola pravdepodobnosti (součet = 1)
pravdepodobnosti = pravdepodobnosti / np.sum(pravdepodobnosti)

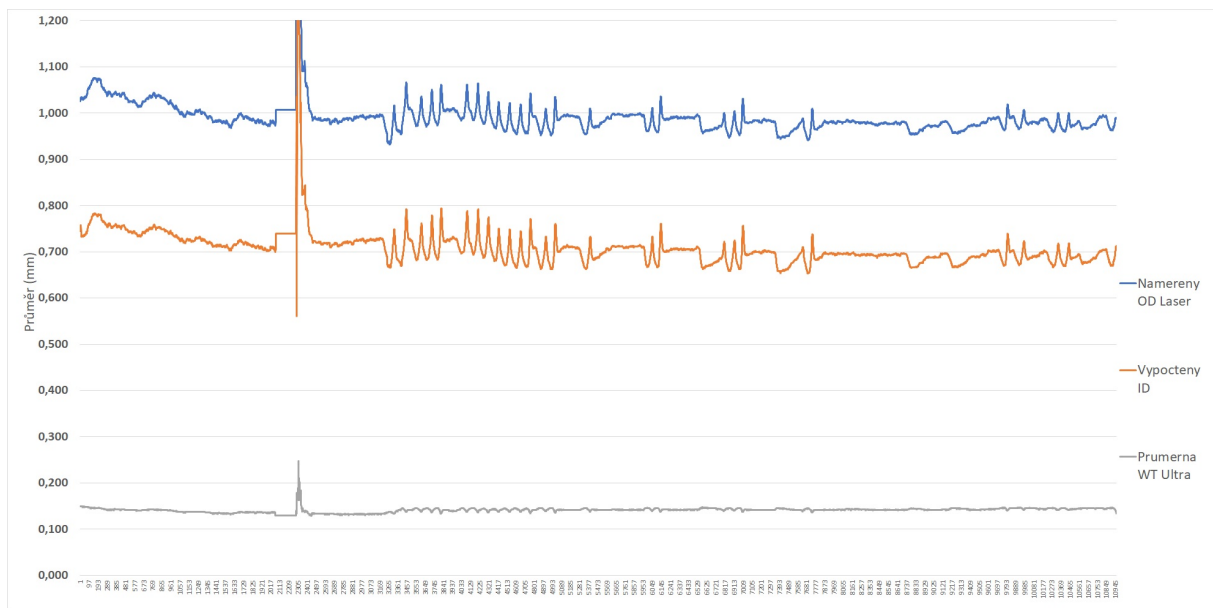
# Generování náhodných hodnot s přiřazenou pravdepodobností
generovane_hodnoty = np.random.choice(hodnoty, size=10, p=pravdepodobnosti)

# Vypis vygenerovaných hodnot
print(generovane_hodnoty)
```

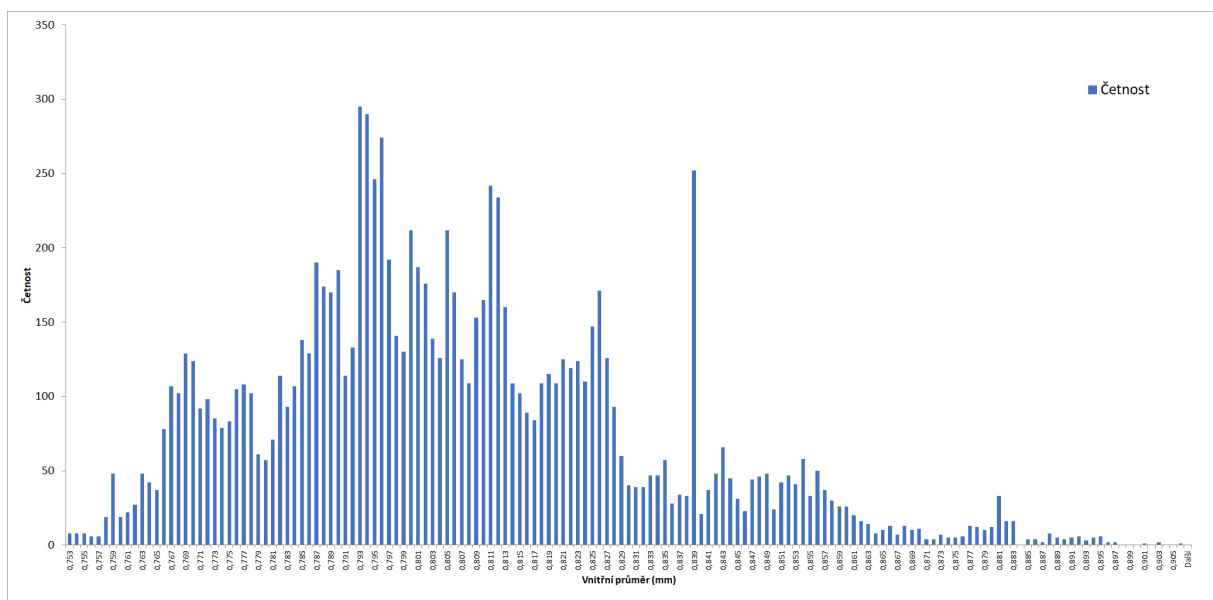
Z důvodu lepšího rozdělení průtoku z předešlých pokusů jsme zvolili vstup a výstup média jako ve variantě (a). Výsledné průtoky jsou vidět na obr.5.11(c). Je patrné, že se průtok ve většině větví zmenšil, jelikož výsledné hodnoty náhodného výběru jsou pravděpodobněji v oblasti poblíž střední hodnoty, což v našem případě je průměr menší než z varianty (a).

Když se podíváme na MNR obr.5.16, tak hodnota dost kolísá oproti předešlým pokusům. V porovnání s variantou (a) je MNR_{max} menší o 0.1, ale u větví 4, 5, 7 a 8 se hodnoty blíží maximu, tudíž celková míra nestejnomyšerného rozložení bude vyšší než v předchozím případě, kde maximum pozorujeme jen na větvi 9.

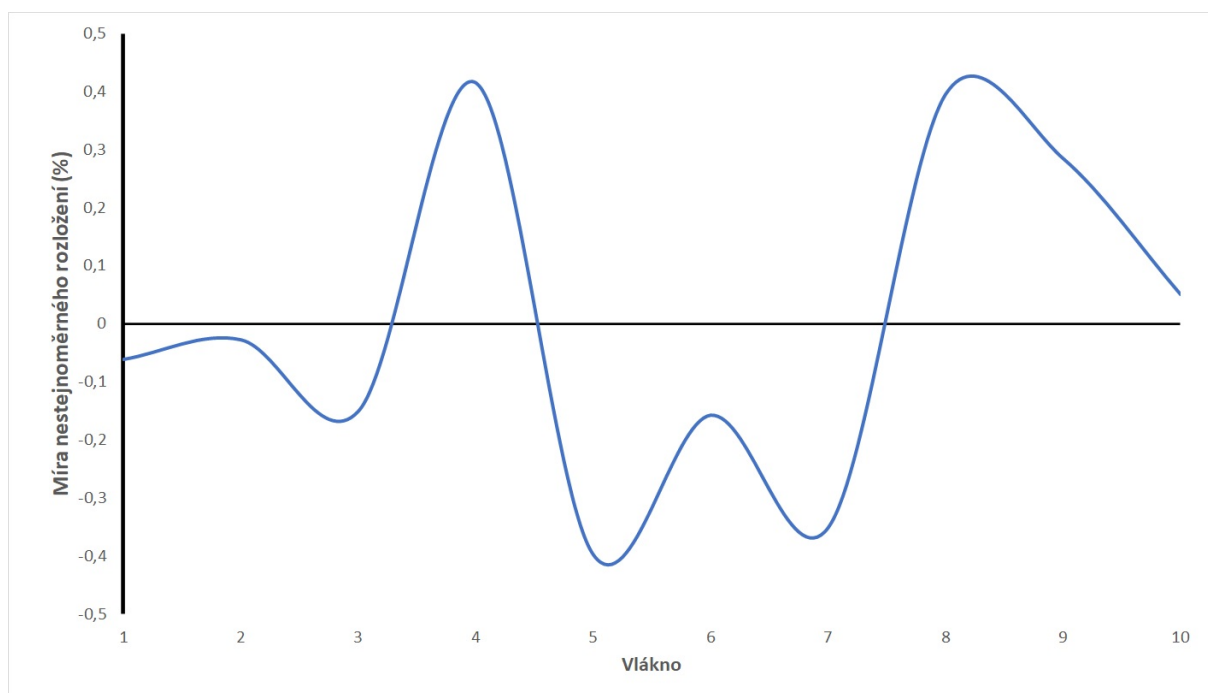
³je to proces, při kterém se četnost hodnot převedou na pravděpodobnost tak, aby součet pravděpodobností byl roven 1



Obr. 5.14: Měření variability průměru



Obr. 5.15: Četnost jednotlivých průměrů



Obr. 5.16: Míra nesterjnoměrného rozložení průtoku ve vláknech pro průtok 2 l/h varianta (c)

Závěr

Mechanismus generování tepla uvnitř baterie je velmi složitý jev, zejména kvůli elektrochemickým reakcím, které probíhají uvnitř baterie, a přenosu iontů. Kvůli komplexnosti tohoto problému se v technické praxi stále spoléháme na experimentální pozorování chování baterie při vybíjecích a nabíjecích procesech.

Při experimentálním měření výkonu výměníku, ve kterém byly uloženy články typu 18650, byly uvažovány zatěžovací cykly v rozsahu od 2,27 do 4,5 C-rate. Taktéž se uvažoval konstantní průtok chladicí kapaliny v rozsahu od 0,3 až 10 l/h. Během jednotlivých experimentů se baterie nabíjely při 0,5 C-rate. Teploty až na jeden případ nepřesáhly 40 °C. Nejvyšší teplota 40,9 °C byla naměřena při průtoku 0,6 l/h a 4,55 C-rate. Pro dosažení žádoucí teploty a teplotní difference by měl být průtok držen mezi 2 až 5 l/h. Pro velmi vysoké C-rate 6,82 by byl optimální průtok 5 l/h.

CFD simulace byla provedena pomocí volně dostupného programu OpenFOAM v.2212. V numerickém modelu bylo zmapováno rozložení průtoku v jednotlivých větvích chladiče. V důsledku časové náročnosti síťování a výsledného výpočtu byl zaveden zjednodušený model. Výpočty jsme provedli pro dvě varianty vstupu a výstupu chladicího média. Následně bylo do modelu zapracováno stochastické rozdělení hydrodynamických odporů jednotlivých větví. Z výsledné analýzy vyšlo, že distribuce průtoků v jednotlivých větvích se dá považovat za rovnoměrnou. Lepší variantou je vstup a výstup chladicí kapaliny na odlišných stranách.

Literatura

- [1] Jaewan Kim, Jinwoo Oh, and Hoseong Lee. Review on battery thermal management system for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 149:192–212, 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111835614X>.
- [2] Learn about batteries. [online]. URL: <https://batteryuniversity.com/articles/>.
- [3] Wenhua H Zhu, Ying Zhu, and Bruce J Tatarchuk. Self-discharge characteristics and performance degradation of ni-mh batteries for storage applications. *International journal of hydrogen energy*, 39(34):19789–19798, 2014.
- [4] David Linden. Handbook of batteries. In *Fuel and energy abstracts*, volume 4, page 265, 1995.
- [5] Tým VSelektro. Co je d.o.d, aneb jak hodnĚ baterii vybĚt? [online], 2020. URL: <https://www.vselektro.eu/depth-of-discharge/>.
- [6] what is a battery c-rating. [online]. URL: <https://www.power-sonic.com/blog/what-is-a-battery-c-rating/>.
- [7] Bms testing with battery cell simulator. [online]. URL: <https://www.comemso.com/battery-cell-simulation>.
- [8] Automobile electrification and heat exchange. [online], 2022. URL: <https://www.pfonline.com/articles/automobile-electrification-and-heat-exchange>.
- [9] Seham Shahid, Branson Chea, and Martin Agelin-Chaab. Development of a hybrid cooling concept for cylindrical li-ion cells. *Journal of Energy Storage*, 50:104214, 2022.
- [10] Jan Bohacek, Miroslav Raudensky, and Ebrahim Karimi-Sibaki. Polymeric hollow fibers: Uniform temperature of li-ion cells in battery modules. *Applied Thermal Engineering*, 159:113940, 2019.
- [11] Michael R Giuliano, Ajay K Prasad, and Suresh G Advani. Experimental study of an air-cooled thermal management system for high capacity lithium–titanate batteries. *Journal of power sources*, 216:345–352, 2012.

- [12] Hussam Jouhara, Nicolas Serey, Navid Khordehgah, Robert Bennett, Sulaiman Almahmoud, and Stephen P Lester. Investigation, development and experimental analyses of a heat pipe based battery thermal management system. *International Journal of Thermofluids*, 1:100004, 2020.
- [13] What is cfd. [online]. URL: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>.
- [14] Battery fast temperature cycling shock. [online]. URL: https://espec.com/na/applications/family/battery_family_2.
- [15] Thomas Lestina and Kenneth Bell. Thermal performance testing of industrial heat exchangers. In *Advances in heat transfer*, volume 35, pages 1–55. Elsevier, 2001.
- [16] ČSN EN 306. Chevess, v.o.s. *Výměníky tepla – Metody měření parametrů potřebných pro stanovení výkonnosti*, 1998.
- [17] Termografie. [online]. URL: <https://www.tediko.cz/termografie/>.
- [18] <https://www.richtek.com/>. [online]. URL: <https://www.richtek.com/>.
- [19] Todd M Bandhauer, Srinivas Garimella, and Thomas F Fuller. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, 158(3):R1, 2011.
- [20] Vojtěch Knotek. *Vliv teploty na parametry baterií*. PhD thesis, ČVUT v Praze. Fakulta elektrotechnická, 2019.
- [21] John T. Warner. Chapter 3 - lithium-ion battery operation. In John T. Warner, editor, *Lithium-Ion Battery Chemistries*, pages 43–77. Elsevier, 2019.
- [22] Batteries | fast charging. In Jürgen Garche, editor, *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, pages 424–442. Elsevier, Amsterdam, 2009.
- [23] D Linden and TB Reddy. *Handbook of batteries* third ed, 2002.
- [24] Cheng-Tao Tsai, Ying-Che Kuo, Ying-Piao Kuo, and Chin-Tsung Hsieh. A reflex charger with zvs and non-dissipative cells for photovoltaic energy conversion. *Energies*, 8(2):1373–1389, 2015.
- [25] Elie Ayoub and Nabil Karami. Review on the charging techniques of a li-ion battery. In *2015 Third International Conference on Technological Advances*

- in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE)*, pages 50–55. IEEE, 2015.
- [26] Peter HL Notten, JHG Op het Veld, and JRG Van Beek. Boostcharging lithium batteries: A challenging new charging concept. *Journal of Power Sources*, 145(1):89–94, 2005.
- [27] Anna Tomaszewska, Zhengyu Chu, Xuning Feng, Simon O’kane, Xinhua Liu, Jingyi Chen, Chenzhen Ji, Elizabeth Endler, Ruihe Li, Lishuo Liu, et al. Lithium-ion battery fast charging: A review. *ETransportation*, 1:100011, 2019.
- [28] Jouleovo teplo. [online]. URL: <https://fyzikalnipokusy.cz/1657/jouleovo-teplo>.
- [29] Jianan Zhang, Xiao-Guang Yang, Fengchun Sun, Zhenpo Wang, and Chao-Yang Wang. An online heat generation estimation method for lithium-ion batteries using dual-temperature measurements. *Applied Energy*, 272(4,5):3–6,16–18, 2020.
- [30] Marek Baláš. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, Brno, 3 edition, 2019.
- [31] Methods of heat transfer. [online]. URL: <https://www.physicsclassroom.com/class/thermalP/Lesson-1/Methods-of-Heat-Transfer>.
- [32] Lin Rao and John Newman. Heat-generation rate and general energy balance for insertion battery systems. *Journal of the Electrochemical Society*, 144(8):2697, 1997.
- [33] Marc Doyle, Thomas F Fuller, and John Newman. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell. *Journal of the Electrochemical society*, 140(6):1526, 1993.
- [34] D Bernardi, E Pawlikowski, and John Newman. A general energy balance for battery systems. *Journal of the electrochemical society*, 132(1):5, 1985.
- [35] Yanqing Lai, Shuanglong Du, Liang Ai, Lihua Ai, Yun Cheng, Yiwei Tang, and Ming Jia. Insight into heat generation of lithium ion batteries based on the electrochemical-thermal model at high discharge rates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(38):13039–13049, 2015.
- [36] Marc Doyle, John Newman, Antoni S Gozdz, Caroline N Schmutz, and Jean-Marie Tarascon. Comparison of modeling predictions with experimental

- data from plastic lithium ion cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 143(6):1890, 1996.
- [37] Ashkan Nazari and Siamak Farhad. Heat generation in lithium-ion batteries with different nominal capacities and chemistries. *Applied Thermal Engineering*, 125:1501–1517, 2017.
- [38] Yoshitaka Inui, Satoshi Hirayama, and Tadashi Tanaka. Detailed estimation method of heat generation during charge/discharge in lithium-ion battery using equivalent circuit. *Electronics and Communications in Japan*, 102(12):3–14, 2019.
- [39] Chil-Hoon Doh, Yoon-Cheol Ha, and Seung-wook Eom. Entropy measurement of a large format lithium ion battery and its application to calculate heat generation. *Electrochimica Acta*, 309:382–391, 2019.
- [40] M Shadman Rad, DL Danilov, M Baghalha, M Kazemeini, and PHL Notten. Adaptive thermal modeling of li-ion batteries. *Electrochimica acta*, 102:183–195, 2013.
- [41] Jialong Liu, Zonghou Huang, Jinhua Sun, and Qingsong Wang. Heat generation and thermal runaway of lithium-ion battery induced by slight overcharging cycling. *Journal of Power Sources*, 526:231136, 2022.
- [42] Man Chen, Qiujuan Sun, Yongqi Li, Ke Wu, Bangjin Liu, Peng Peng, and Qingsong Wang. A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module. *Energies*, 8(1):490–500, 2015.
- [43] Kangkang Wang, Fei Gao, Yanli Zhu, Hao Liu, Chuang Qi, Kai Yang, and Qingjie Jiao. Internal resistance and heat generation of soft package li4ti5o12 battery during charge and discharge. *Energy*, 149:364–374, 2018.
- [44] Shashank Arora and Ajay Kapoor. Experimental study of heat generation rate during discharge of lifepo4 pouch cells of different nominal capacities and thickness. *Batteries*, 5(4):70, 2019.
- [45] Kaiwei Chen, Grant Unsworth, and Xianguo Li. Measurements of heat generation in prismatic li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 261:28–37, 2014.
- [46] Co je termočlánek / termoelektrický snímač teploty? [online]. URL: <https://www.jakar.cz/advisor/co-je-termoclanek>.
- [47] John R Speakman and S Ward. Infrared thermography: principles and applications. *Zoology-Jena-*, 101:224–232, 1998.

- [48] V Yu Larin, VM Ryzhykh, AP Shcherban, OM Markina, VP Maslov, and NV Kachur. Use of the infrared thermography method to develop discharging rules for lithium polymer batteries. *Semiconductor Physics Quantum Electronics and Optoelectronics*, 22(2):252–256, 2019.
- [49] Mengyao Lu, Xuelai Zhang, Jun Ji, Xiaofeng Xu, and Yongyichuan Zhang. Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27:101155, 2020.
- [50] Numerical schemes. [online]. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/6-solving/6.2-numerical-schemes>.

Seznam symbolů a zkratek

EV	Elektrické vozidlo
HEV	Hybridní elektrické vozidlo
PCM	materiál s fázovou přeměnou – Phase exchange material
VCC	parní kompresní cyklus – Vapor compression cycle
TIM	materiály tepelného rozhraní – Thermal interface materials
CFD	výpočetní dynamika tekutin – Computational fluid dynamics
ARC	zrychlená kalorimetrie – Accelerating rate calorimetry
IHC	izotermická kalorimetrie vedením tepla – Isothermal heat conduction calorimetry
SEI	mezifáze pevného elektrolytu – Solid electrolyte interphase
I	proud
ρ	hustota
c_{cp}	měrná tepelná kapacita
λ	součinitel tepelné vodivosti
m	hmotnost
T	teplota
Q	teplo
Q_J	Jouelovo teplo
I	proud
R	odpor
H	rozkladné teplo
ESR	zdánlivý odpor
t	čas
q	měrný tepelný tok

α	součinitel přestupu tepla
l	charakteristický rozměr
w	rychlost proudící tekutiny
ν	kinematická viskozita
σ	Stefan-Boltzmanova konstanta