

KATEDRA EKONOMIKY,
MANAŽERSTVÍ A HUMANITNÍCH
VĚD

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
TEPLOTNÍ MANAGEMENT
BATERIÍ PRO
ELEKTROMOBILY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

LEDEN 2024

**MILOŠ
KVASNIČKA**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kvasnička** Jméno: **Miloš** Osobní číslo: **499204**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Teplotní management baterií pro elektromobily

Název bakalářské práce anglicky:

Battery thermal management system for electric vehicles

Pokyny pro vypracování:

Baterie hrají klíčovou roli v rozvíjející se elektromobilitě. Baterie na bázi lithia poskytují velkou hustotu energie, ale jejich bezpečný provoz a životnost silně závisí na kontrole teploty při běžném provozu a zejména při rychlém nabíjení. Aktivní i pasivní chlazení jednotlivých článků i celých baterií jsou předmětem výzkumu. Cílem práce je provést numerickou simulaci (metodou konečných prvků) přenosu tepla při nabíjení baterie s několika Li-ion články a porovnat efektivitu různých způsobů chlazení. Práce se zaměří na chlazení pomocí materiálů s fázovým přechodem (phase change materials - PCM) a porovná různé způsoby chlazení z hlediska účinnosti i z hlediska ekonomického.

Požadavky:

- 1) Seznamte se s problematikou chlazení baterií pro elektromobily (Battery Thermal Management Systems - BTMS).
- 2) Seznamte se s numerickou metodou konečných prvků (v programu Comsol Multiphysics).
- 3) Simulujte odvod tepla z baterie během nabíjení.
- 4) Vyhodnoťte ekonomickou efektivitu chlazení pomocí materiálů s fázovým přechodem.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Javani, N., Dincer, I., Naterer, G.F. and Yilbas, B.S., 2014. Heat transfer and thermal management with PCMs in a Li-ion battery cell for electric vehicles. International Journal of Heat and Mass Transfer, 72, 690-703.
- [2] Heyhat, M.M., Mousavi, S. and Siavashi, M., 2020. Battery thermal management with thermal energy storage composites of PCM, metal foam, fin and nanoparticle. Journal of Energy Storage, 28, 101235.
- [3] Froš, D., Veselý, P., Zemen, J. and Dušek, K., 2022. Latent heat induced deformation of PCB substrate: Measurement and simulation. Case Studies in Thermal Engineering, 102173.
- [4] Kim, J., Oh, J. and Lee, H., 2019. Review on battery thermal management system for electric vehicles. Applied thermal engineering, 149, 192-212.
- [5] D. Castelvechi, 2021, Electric cars and batteries: how will the world produce enough?, Nature, 596, 336-339.
- [6] Offer, G., Patel, Y., Hales, A., Bravo Diaz, L. and Marzook, M., 2020, Cool metric for lithium-ion batteries could spur progress. Nature, 582, 485-487.
- [7] Lebrouhi, B.E., Lamrani, B., Ouassaid, M., Abd-Lefdil, M., Maaroufi, M. and Kousksou, T., 2022. Low-cost numerical lumped modelling of lithium-ion battery pack with phase change material and liquid cooling thermal management system. Journal of Energy Storage, 54, 05293.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Mgr. Jan Zemen, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **11.09.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **16.02.2025**

Mgr. Jan Zemen, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

V řadě první bych chtěl vyjádřit dík svému vedoucímu Mgr. Janu Zemenovi, Ph.D. za vedení, pomoc a za cenné rady k bakalářské práci. Dále bych chtěl poděkovat panu MSc. Václavu Knapovi, Ph.D. za poskytnutí relevantních nápadů a zdrojů. Další poděkování patří Ing. Martinu Horákovi za konzultace a pomoc s ekonomickou částí této práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mým přátelům za věcné připomínky a relevantní rady ke psaní práce. Velký dík zajisté přísluší mé rodině za podporu a za pomoc při studiu.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 7. ledna 2024

.....

ABSTRAKT

Bakalářská práce je věnována problematice chlazení lithium-iontových baterií, jejichž primárním účelem je napájení pohonu elektromobilu.

Zaměřením této bakalářské práce je využití materiálů s fázovým přechodem pro odvod tepla z lithiových akumulátorů. Přínos těchto materiálů je posouzen jednak z technické části, sestávající z numerické simulace metodou konečných prvků v prostředí COMSOL, a jednak z ekonomické části, jejíž cílem je ohodnocení chlazení pomocí materiálů s fázovým přechodem.

Klíčová slova: Bateriový systém, materiál s fázovým přechodem, teplotní management, chlazení elektromobilu, pasivní chlazení, aktivní chlazení, metoda konečných prvků

ABSTRACT

The bachelor thesis is devoted to the problem of cooling of lithium-ion batteries, whose primary purpose is to power the drive of an electric vehicle.

The focus of this bachelor thesis is the use of phase change materials for heat removal from lithium batteries. The contribution of these materials is assessed both from the technical part, consisting of numerical simulations using the finite element method in the COMSOL environment, and from the economic part, which aims to evaluate the cooling using phase change materials.

Keywords: Battery pack, phase change material, thermal management, electric vehicle cooling, passive cooling, active cooling, finite element method

OBSAH

ÚVOD.....	1
KAPITOLA 1: BATERIE V ELEKTROMOBILU.....	2
1.1 VNITŘNÍ STAVBA LI-ION ČLÁNKU.....	2
1.2 KONSTRUKCE LI-ION BATERIE.....	4
1.2.1 Bateriový článek.....	4
1.2.2 Bateriový modul.....	5
1.2.3 Bateriový systém.....	5
KAPITOLA 2: TEPLOTNÍ MANAGEMENT.....	6
2.1 PROBLEMATIKA TEPLoty BATERÍ.....	6
2.2 NEGATIVNÍ DŮSLEDKY VYŠŠÍCH TEPLot.....	6
2.2.1 Efekt zahoření.....	6
2.2.2 Degradace materiálu.....	7
2.3 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA CHLADICÍCH SYSTÉMŮ.....	7
2.3.1 Systém s aktivním chlazením.....	8
2.4 CHLAZENÍ POMOCÍ MATERIÁLŮ S FÁZOVÝM PŘECHODEM.....	9
2.4.1 Vlastnosti materiálů s fázovým přechodem.....	9
KAPITOLA 3: MODEL CHLAZENÍ BATERIOVÉHO MODULU.....	10
3.1 MODELOVÁNÍ V PROSTŘEDÍ COMSOL.....	10
3.2 MODEL LITHIOVÉHO AKUMULÁTORU.....	10
3.3 NAPĚTÍ NAPRÁZDNO.....	11
3.3.1 Polarizace elektrod.....	12
3.3.2 Pokles kapacity baterie.....	13
3.3.3 Geometrie článku.....	14
3.4 AKUMULÁTORY V SÉRII.....	14
3.5 GLYKOLOVÝ OKRUH.....	15
3.6 MATERIÁL S FÁZOVÝM PŘECHODEM.....	16
3.6.1 Parametry PCM materiálu.....	16
3.6.2 Simulace tání PCM.....	16
3.7 VLIV POČTU ELEMENTŮ NA VÝSLEDKY SIMULACE.....	18
KAPITOLA 4: SIMULACE CHLAZENÍ.....	21
4.1 PCM V PASIVNÍM CHLAZENÍ.....	22
4.1.1 Srovnání teplot modulů při počáteční teplotě 20 °C.....	22
4.1.2 Srovnání teplot modulů při počáteční teplotě 26 °C.....	23

4.2 KOMBINACE PCM S AKTIVNÍM CHLAZENÍM.....	24
4.2.1 Srovnání teplot modulů při počáteční teplotě 20 °C.....	24
4.2.2 Srovnání teplot modulů při počáteční teplotě 26 °C.....	25
4.3 POROVNÁNÍ AKTIVNÍHO A PASIVNÍHO CHLAZENÍ.....	26
4.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	29
KAPITOLA 5: SIMULACE POKLESU KAPACITY.....	30
5.1 PROUDOVÁ ZÁTĚŽ BATERIOVÉHO MODULU.....	31
5.2 STANOVENÍ CELKOVÉ DOBY KU JEDNOMU CYKLU.....	31
5.3 SIMULACE TEPLŮ BĚHEM JEDNOHO CYKLU.....	32
5.4 SROVNÁNÍ PASIVNÍCH CHLAZENÍ.....	33
5.5 SROVNÁNÍ AKTIVNÍCH CHLAZENÍ.....	34
5.6 SROVNÁNÍ AKTIVNÍHO A PASIVNÍHO CHLAZENÍ.....	35
5.7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	36
KAPITOLA 6: OHODNOCENÍ VYUŽITELNOSTI PCM.....	37
6.1 CENA PCM.....	37
6.2 CENA BATERIÍ.....	38
6.3 VYUŽITÍ PCM V PASIVNÍM CHLAZENÍ.....	38
6.4 VYUŽITÍ PCM V AKTIVNÍM CHLAZENÍ.....	40
6.5 POROVNÁNÍ AKTIVNÍHO A PASIVNÍHO CHLAZENÍ.....	41
6.6 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	43
ZÁVĚR.....	44
REFERENCE A POUŽITÁ LITERATURA.....	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1, fotografie jedné kompaktní struktury lithiového akumulátoru převzatého z [5] (upraveno)	3
Obrázek 1.2, příčně rozříznutý prismatický článek.....	4
Obrázek 2.1, dvouokruhové aktivní chlazení	8
Obrázek 3.1, geometrie jednoho článku.....	14
Obrázek 3.2, simulovaný bateriový modul	14
Obrázek 3.3, geometrie chladicího okruhu	15
Obrázek 3.4, síť konečných prvků na bateriovém článku	18
Obrázek 4.1, teplota ϑ (°C) na povrchu článku chlazeného glykolovým okruhem	27
Obrázek 4.2, teplota ϑ (°C) na povrchu článku chlazeného PCM	28

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1, parametry článku.....	10
Tabulka 4.1.....	22
Tabulka 4.2.....	23
Tabulka 4.3.....	24
Tabulka 4.4.....	25
Tabulka 4.5.....	26
Tabulka 5.1.....	33
Tabulka 5.2.....	34
Tabulka 5.3.....	35
Tabulka 6.1, hodnoty NPVR v závislosti na diskontu a ceně PCM	39
Tabulka 6.2, sestava aktivního chlazení.....	41
Tabulka 6.3, peněžní toky pro NPV	42

ÚVOD

Lithium-iontové baterie nacházejí v oblasti elektromobility prozatím bezkonkurenční využití jako primární chemické akumulátory energie. Ačkoli tento typ akumulátoru nabízí unikátní energetické parametry v oblasti chemických článků, tak automobil s elektrickým pohonem není plně zaměnitelným substitutem vůči automobilu, jehož primárním pohonem je tepelný stroj. Jedním z důvodů je obtížnost akumulace elektrické energie, která zahrnuje jak nižší hustotu uchované energie, tak její pomalejší akumulaci v porovnání s tepelnou energií, kterou využívá spalovací motor.

Uživatelé, kteří rychlost akumulace energie velmi preferují, vítají možnost co možná nejrychlejšího dobíjení bateriových článků v elektromobilu. Je však zřejmé, že velký tok energie znamená v elektroenergetice velkou proudovou/napěťovou zátěž akumulátoru a s ní spojené tepelné ztráty. Generované teplo lze z bateriového systému odvádět vhodně navrženým chlazením, chceme-li k bateriovému systému přistupovat co nejšetrněji z důvodu životnosti a pokud zároveň chceme užívatí výhod rychlejší akumulace energie do baterií. Jednou z možností odvodu tepla z článků je využití materiálů s fázovým přechodem (PCM), které v požadovaném teplotním rozsahu dokáží absorbovat značné množství tepla pro svou fázovou přeměnu a snížit tím nárůst teplot bateriových článků.

Zatím není známo, že by tyto materiály s fázovým přechodem byly komerčně využívány v chladicích systémech pro akumulátory, a nemáme ani žádné konkrétní informace o způsobu využití PCM pro chlazení baterií. Z tohoto důvodu budeme testovat jejich potenciální výhodu pro odvod tepla z lithiových akumulátorů pomocí simulace metodou konečných prvků. V prvním setu simulací, sepsaném ve čtvrté kapitole, je porovnáván přínos PCM pro pasivní a aktivní chlazení lithiových akumulátorů pomocí průběhu průměrných teplot při rychlém nabíjení 1,4C. V druhém setu simulací je přínos aplikace PCM vyhodnocován pomocí změny životnosti článků při cyklickém provozu na základě vypočítaných provozních teplot, načež jsou tato data využita pro poslední kapitolu, ve které je ohodnocena potenciální výhoda užití materiálů s fázovým přechodem pro životnost článků.

KAPITOLA 1: BATERIE V ELEKTROMOBILU

Jako hlavní nosič energie pro trakční elektrický pohon v elektromobilu stále dominují lithiové akumulátory, především díky vysoké hustotě energie, kterou je lithiový akumulátor schopen uchovávat [1]. Chemické a konstrukční složení lithiových baterií se různí, obecně budeme takový článek označovat jako lithium-iontový (Li-Ion) článek.

Uvedme si pro začátek některé elektrické a jiné fyzikální parametry bateriového článku, které nás budou v dalších sekcích zajímat.

1. Elektrický náboj Q , také označovaný jako kapacita baterie. Znamená náboj, který je bateriový článek schopen dodat do napájené soustavy za určitých podmínek (pracovní proud I , teplota článku ϑ). Proto jmenovitý náboj Q_n , který nalezneme na štítku článku, je platný pouze za splnění jiných jmenovitých či doporučených provozních hodnot [2].
2. Napětí U . Jmenovité napětí U_n je střední hodnota mezi hodnotou při minimálním a maximálním nabití článku. Typická střední hodnota u lithiového článku nabývá hodnoty $U_n = 3,7 \text{ V}$, přičemž pracovní rozsah napětí od vybitého po nabitý článek činí $U = (3 \div 4,2) \text{ V}$ [3].
3. Energie článku W . Orientačně lze energii článku spočítat jako $W = Q \cdot U$. Obvykle je skutečná energie, kterou je článek schopen dodat, nižší kvůli disipativním procesům [2].
4. Konstanta nabíjení C , jejíž číslo ukazuje, jakou relativní velikostí proudu se článek nabíjí. Velikost 1C znamená, že celkový využitelný náboj článku je dobíjen po čas 1 h. Například pro článek o náboji $Q = 3 \text{ Ah}$ by číslo 1C znamenalo, že článek je dobíjen proudem $I = 3 \text{ A}$.

1.1 Vnitřní stavba Li-Ion článku

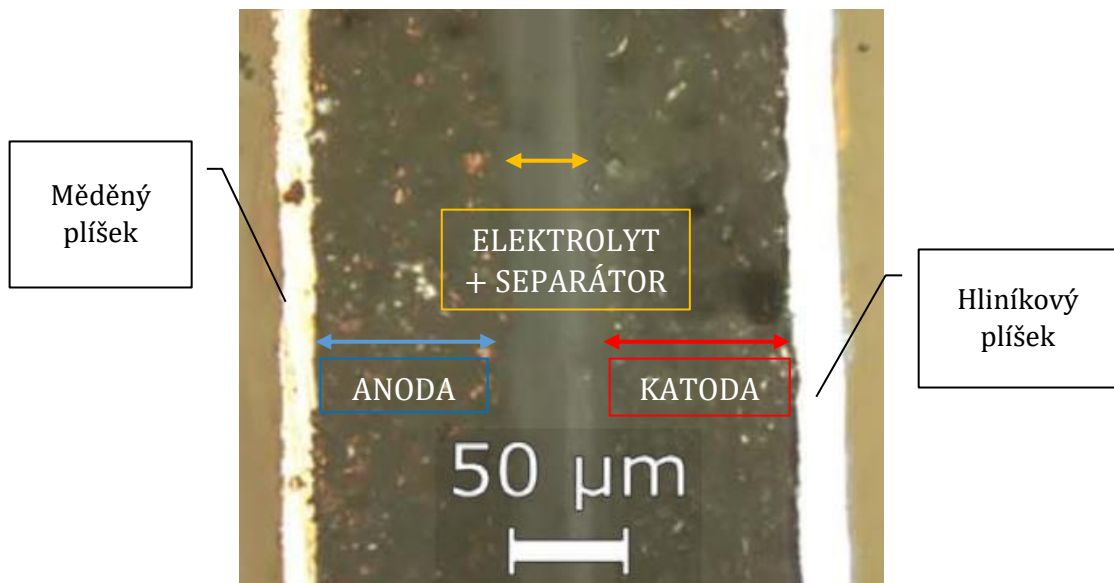
Ačkoli se během práce nebudeme podrobněji zabývat chemickými procesy, které jsou podstatou vybíjecích/nabíjecích cyklů, uvedeme si alespoň zjednodušený popis chemického složení lithiového akumulátoru, protože se na některé pojmy ze stavby článku budeme v práci odvolávat.

- Anoda posluhuje jako hostitel iontů lithia. Proces nabíjení probíhá vmezeřením (interkalací) lithia do mřížky materiálu anody; kladné lithiové ionty Li^+ pronikají z elektrolytu do absorpčního materiálu, kterým může být například grafit, a rekombinují s elektrony. Vývodem záporné elektrody je obvykle měděný vodič.
- Katoda je zdrojem lithia při elektrochemických reakcích. Z důvodu bezpečnosti nesestává pouze z čistého lithia, nýbrž z prvků tvořících chemickou vazbu s lithiem, např. LiMn_2O_4 , LiCoO_2 nebo $\text{LiFe}(\text{PO}_4)$. Složitější strukturou může být kombinovaný typ NMC, jehož katoda je tvořena vrstevnatým oxidem $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$, přičemž $x + y + z = 1$. Při procesu nabíjení je z chemické vazby uvolněn elektron, důsledkem je odštěpení iontu Li^+ , který vstupuje do elektrolytu. Vývodem kladné elektrody je obvykle hliníkový vodič.
- Elektrolyt je umístěn mezi anodou a katodou. Je nezbytný pro pohyb kladný lithiových iontů, pohyb elektronů přes elektrolyt je naopak nežádoucí. Neřízený elektronový pohyb skrz elektrolyt znamená neúčinnou práci, jejíž důsledkem je nežádoucí ohřev baterie či v extrémním případě úplný zkrat. Průniku elektronů do elektrolytu však zabraňuje tzv. pasivační vrstva SEI (solid electrolyte interface), která se přirozeně vytváří na rozhraní s elektrodou. Elektrolytem mohou být lithiové soli, jako například LiPF_6 , LiAsF_6 či LiClO_4 , které jsou bez aditiv v kapalném stavu. Pevné či gelové elektrolyty využívají kompozit

sestavající z polymerové výztuže (poly(ethylenoxid), poly(methylmetakrylát)) a lithiové soli jako výplně.

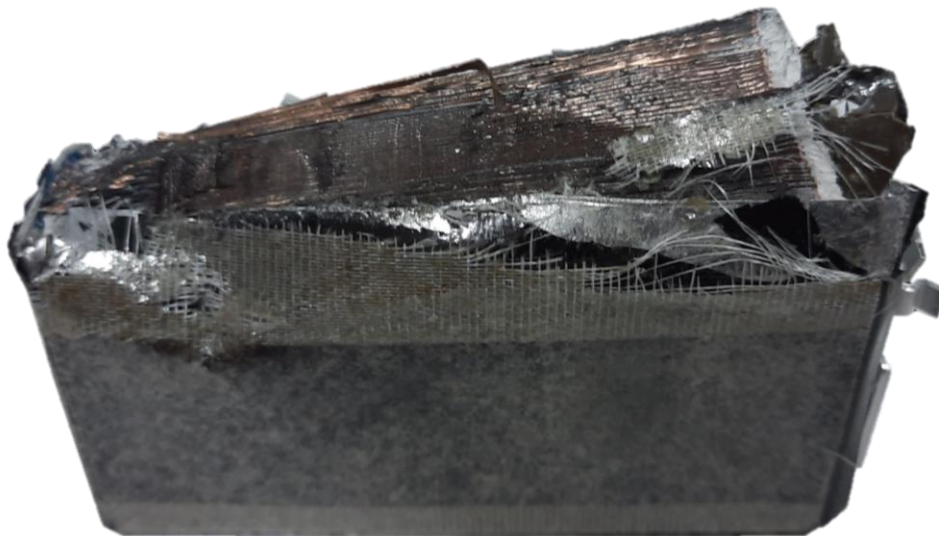
- Separátor má za primární funkci zabránit průniku elektronů z anody do katody, pokud by selhala přirozená ochrana v podobě pasivační vrstvy a je obvykle umístěn v elektrolytu. Na chemických procesech v článku se nijak nepodílí. Separátorem může být polyethylen (PE) nebo polypropylen (PP), případě jejich kombinace. [1, 4]

Na obrázku 1.1 vidíme složky lithiového NMC akumulátoru s grafitovou anodou. Elektrolyt se skládá ze soli LiPF_6 zasazené do vrstev ethylen-karbonátu a diethyl-karbonátu. Kromě elektrolytu je v prostřední vrstvě i separátor, který v tomto případě sestává z dohromady 25 μm tlusté membrány typu Cellgard 2325, kterou tvoří tři polymerové vrstvy (PE/PP/PE) [5].



Obrázek 1.1, fotografie jedné kompaktní struktury lithiového akumulátoru převzatého z [5] (upraveno)

V praxi je v jednom akumulátoru několik vrstev, které jsou dle konstrukce článku buď oddělené, nebo jako v případě prismatického článku na obrázku 1.2 obsahují jednu dlouhou vrstvu, která je srolována do požadovaného (v tomto případě přibližně obdélníkového) tvaru. Vidíme, že elektrolyt, anoda i katoda jsou kvůli černému zbarvení prakticky nerozeznatelné.



Obrázek 1.2, příčně rozříznutý prismatický článek

1.2 Konstrukce Li-Ion baterie

1.2.1 Bateriový článek

Výše popsané vodivé a funkční vrstvy se skládají do jisté kompaktní struktury (viditelné na obrázku 1.1). Více kompaktních vrstev je odděleno izolačními mezivrstvami, aby nedošlo ke zkratu elektrodových vodičů. Výsledkem zapouzdření těchto skládaných vrstev je jeden bateriový článek. Pro tuto práci bude vzhledem k teplotnímu managementu účelné, když si články rozdělíme dle jejich tvaru:

- Cylindrický – jedna dlouhá vrstva je zavinuta do válce, který je chráněn v ochranném, obvykle ocelovém pouzdře. Výsledný tvar připomíná běžný alkalický monočlánek, horní část s výstupkem ve prostředku je kladnou elektrodou, spodní plochá strana je elektrodou zápornou.
- Prismatický – jedná se rovněž o svitek funkční vrstvy, podobě jako v případě cylindrické baterie, avšak nejde o navíjení do tvaru válce, nýbrž do tvaru kvádrů. Svitek je chráněn nerezovým pouzdem s vývody obou polarit na horní straně článku.
- Sáčkový – vrstvy jsou ponechány bez úpravy tvaru, napěťové svorky jsou obvykle z baterie vyvedeny v podobě tenkých poutek, ačkoli se lze setkat i s pevně zapouzdřenými sáčkovými články. [6]

1.2.2 Bateriový modul

Zapojení více článků do jednoho celku, který bývá konstrukčně a vizuálně oddělen od ostatních funkčních či energetických jednotek, budeme v této práci nazývat bateriový modul. Přesné definice a vymezení bateriového modulu se různí. Uvedme pro příklad definici dle výrobce baterií A123 SYSTEMS, INC.:

„Bateriovým modulem se rozumí kombinace součástí bateriového systému, která zahrnuje alespoň tyto součásti: bateriový článek, elektroniku pro správu bateriových článků pro jejich vyvažování, měření napětí a teploty...“ [7, str. 2]

1.2.3 Bateriový systém

Více bateriových modulů zapojených do funkčního celku včetně všech zařízení, které jsou potřebné k jejich správné funkci, budeme nazývat bateriový systém (battery pack). Bateriový systém bývá obklopen vodotěsným pouzdrem, jehož vstupy a výstupy jsou:

- Vysokonapěťové vstupní konektory pro nabíjení, obvykle jde o konektor se stejnosměrným proudem pro rychlé nabíjení (označován jako DC fast charge) a o konektor se stejnosměrným proudem pro pomalejší „nabíjení střídavým proudem“ (nikoli doslovně, proud musí být usměrněn v měniči, který bývá umístěn v elektromobilu mimo bateriový systém).
- Vysokonapěťové výstupní konektory pro napájení elektrických pohonů elektromobilu (hnací motor, kompresor pro chladicí okruh) a jiných zařízení (olověný akumulátor).
- Nízkonapěťové vstupní a výstupní konektory potřebné pro přenos signálů sloužících k řízení polovodičových měničů a pro monitoring součástek.
- Vstup a výstup chladicího okruhu. [8]

Jmenovité napětí bateriového systému se různí, může se pohybovat v širokém rozmezí $U_{bk} = (300 \div 800) \text{ V}$ [9], přičemž rozsah uložené energie se různí rovněž. Uvedme si pro představu nejvyšší hodnotu uchovatelné energie bateriového systému, který je nyní dostupný na trhu v modelu Mercedes EQS 450+, jejíž hodnota činí 107,8 kWh [10].

KAPITOLA 2: TEPLOTNÍ MANAGEMENT

2.1 Problematika teploty baterií

Příčinou vzniku nežádoucího tepla v baterii jsou jak chemické, tak fyzikální principy. Exotermními reakcemi uvnitř baterie jsou polarizační reakce mezi elektrodami a elektrolytem, ve vyšších teplotách to může být i rozklad SEI vrstvy [11]. Předpokladatelným fyzikálním principem je pak Joulův ohřev při aktivním používání baterie.

Optimální pracovní rozsah teplot lithiových baterií se odlišuje podle konstrukce a chemického složení článku; obecně lze říci, že spadá do rozsahu teplot (20 ÷ 25) °C. Nižší teploty jsou pro bateriové články nepříznivé, důsledkem je zpomalení elektrochemické procesů, což se projevuje jako nárůst vnitřního odporu napěťového zdroje. Při teplotách nad 25 °C roste reakční rychlost chemických procesů, takže v rozsahu přibližně (25 ÷ 50) °C je vyšší hodnota okamžitého výkonu, který je baterie schopna dodat do poháněné soustavy (nebo naopak využít vyšší výkon pro nabíjení). Zároveň platí, že vyšší teploty jsou příznivé i pro nežádoucí mechanické procesy a s nimi spojené chemické reakce (popsané v kapitole 2.2.2) způsobující rychlejší degradaci elektrod akumulátoru, což se následně projevuje poklesem schopnosti baterie uchovávat energii. [12, 13]

Protože se tato práce zaměřuje pouze na chladicí systémy, tak se budeme dále zabývat výhradně problematikou vyšších pracovních teplot baterií.

2.2 Negativní důsledky vyšších teplot

2.2.1 Efekt zahoření

Zahoření bateriového článku (Thermal runaway) znamená tepelnou pozitivní zpětnou vazbu. Jde o proces uvolňování tepla, jehož následkem je iniciace další, ještě prudší exotermní reakce uvnitř bateriového článku. Proces může být iniciován mechanickým narušením článku (proražení článku naskrz tak, že vznikne přímý kontakt mezi kladnou a zápornou elektrodou), elektrickým narušením článku (například připojením napěťového zdroje o násobně vyšším napětí než je jmenovité napětí článku) nebo tepelným narušením článku. Při teplotě 130 °C se začíná tavit separátor, pokud při této (nebo menší) teplotě zaniká také pasivační vrstva, je důsledkem volný průnik elektronů z anody do katody a nastává zkrat baterie. V případě NMC či LFP článků probíhá rozklad pasivační vrstvy až při vyšších teplotách (150 ÷ 170) °C. Rozklad pasivačních vrstev má za následek sled reakcí elektrolytu s materiálem anody za vzniku CO₂, O₂ a malého množství plynných alkanů (metan, ethan). Vznik těchto plynů je první exotermní reakcí při tepelném zatížení, ale oproti reakcím při zkratu má množství uvolněného tepla mírný průběh. Při teplotách (208 ÷ 223) °C dochází na anodě k rozkladu lithiových solí, což je nejprudší exotermní reakce v bateriovém článku; jedním z produktů rozkladu katodové soli je opět kyslík, takže v kombinaci s uvolněnými alkany může za vysokých teplot dojít k prudké oxidaci, čímž dochází k úplné destrukci článku. [14, 15]

Kritickou teplotou bateriového článku v modulu budeme myslet teplotu, při které může nastat efekt zahoření. Hodnota této kritické teploty se liší v závislosti na fyzickém a chemickém uspořádání baterie. Jako příklad uveďme experiment s LiFe(PO₄) prismatickým článkem s uhlíkovou anodou o jmenovitém náboji 25 Ah. K iniciaci tepelné pozitivní zpětné vazby došlo při teplotě 120 °C, avšak důsledkem záměrného přebíjení (vysoká teplota nebyla prvotní příčinou) [16]. Reprezentativními teplotami pro efekt zahoření baterie mohou (pro kapitolu simulací) být naměřené hodnoty v [15], kde byla pro NMC článek naměřena teplota 168 °C pro první exotermní reakci při pouze tepelném namáhání.

2.2.2 Degradace materiálu

Postup degradace lithiového akumulátoru je možné charakterizovat jednoduše měřitelnými veličinami, kterými jsou pokles celkového náboje a nižší maximální výkon. Přesný chemický proces těchto degradačních mechanismů se odlišuje dle složení elektrod; obecně lze tyto mechanismy popsat jako:

- Pokles množství využitelného materiálu, který probíhá na obou elektrodách.
- Ztráta lithiových iontů schopných cyklické interkalace na anodě a chemické vazby na katodě, což znemožňuje pohyb mezi elektrodami.
- Vznik nových produktů v důsledku jiných nežádoucích chemických reakcí, příkladem mohou být reakce elektrolytu s vlhkostí. V případě často užívaného LiPF_6 elektrolytu může při přítomnosti malého množství vody nastat hydrolýza [4], přičemž jedním z produktů je chemicky agresivní fluorovodík. [17]

Příkladem obecné ztráty využitelného materiálu je praskání materiálu v důsledku mechanického namáhání, a to především kvůli změně objemu materiálu při tepelném vytížení. V oblasti kontaktu elektrody s kovovým vývodem tak dochází k narušení elektrického kontaktu, což má za následek nárůst vnitřního odporu akumulátoru. V materiálu elektrody také může při trvalém praskání docházet k tvorbě tzv. izolovaných ostrůvků. Tyto ostrůvky se stanou inaktivním materiálem, což se projevuje úbytkem kapacity. [17]

Jedním ze zaznamenaných principů ztráty částic Li je nárůst pasivační vrstvy (SEI), který probíhá především na záporné elektrodě. Kdykoli se karbonová mřížka obsahující lithium dostane do kontaktu s elektrolytem, nastane reakce, jejíž výsledné produkty buď vytvoří prvotní pasivační vrstvu nebo přispějí k jejímu nárůstu. Kvůli depozici lithia a tvorbě malých trhlinek v pasivační vrstvě probíhá tento nárůst tloušťky trvale. Reakce je za provozních teplot nevratná, až při vyšších teplotách může dojít k exotermnímu rozkladu SEI. Druhým zaznamenaným principem je nežádoucí pokovování anody lithiem (lithium plating), ke kterému dochází buď při „nabíjení“ již saturovaného anodového materiálu dalšími ionty Li^+ při rekombinaci s elektrony mimo hostitelskou mřížku, nebo pokud je rychlost interkalace pomalejší než rychlost vedlejších reakcí, což má také za následek rekombinaci Li mimo mřížku hostitelského prvku. [17]

2.3 Obecná charakteristika chladicích systémů

Chlazení můžeme dle způsobu odvádění odpadního tepla rozdělit na pasivní a aktivní.

- Pasivní chlazení je chladicí systém, který při svém fungování nespotřebovává energii [18]. Příkladem pasivního chlazení mohou být kovové chladicí radiátory nebo tepelné trubice.
- Aktivní chlazení naopak pro svůj provoz vyžaduje dodatečnou energii. Takovým chlazením může být jak obyčejný ventilátor zajišťující ofukování chlazené soustavy, tak chladicí okruh zahrnující kompresor, kondenzátor a výparník.

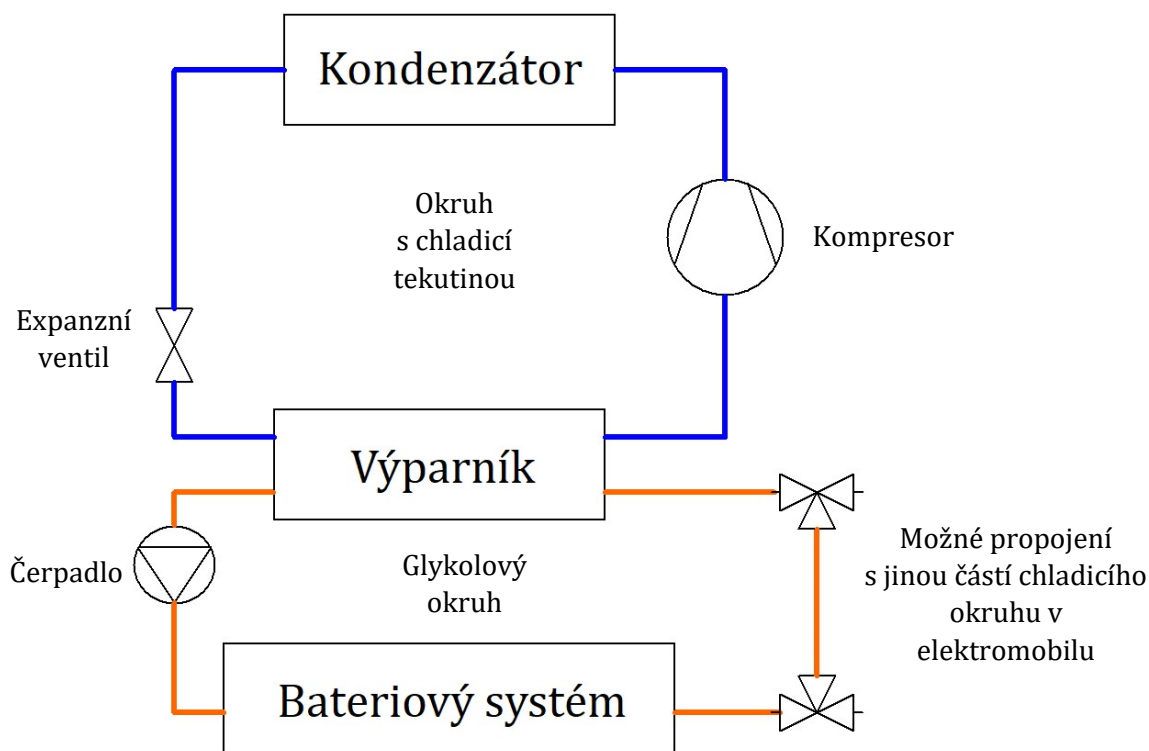
Dále je důležité rozlišovat, zda součást chladicího systému slouží k odvodu tepla ze zdroje k chladiči, či jestli jde o součást, která teplo odvádí mimo chladicí soustavu. Jinými slovy potřebujeme jak tepelný vodič přiléhající k chlazené baterii, tak tepelný výměník, který je schopný teplo odvést mimo chlazenou soustavu.

2.3.1 Systém s aktivním chlazením

Běžně užívaným řešením teplotního managementu baterií je aktivní chlazení v podobě chladicího (který může v případě nízkých teplot být i ohřívací, pokud to konstrukce umožňuje) okruhu, který je v kontaktu s akumulátory v bateriovém systému. Příkladem mohou být elektromobily BMW iX3 2020, BMW i3, BMW i8, Chevrolet Bolt EV, Ford Mach E, Tesla Model 3, které využívají aktivní okruh pro regulaci teploty v bateriovém systému [19].

Aktivní chlazení lze sestavit například pomocí dvou okruhů s odlišným chladivem. Hlavním chladicím médiem je nemrznoucí směs (obvykle směs etylen-glykolu a vody), která je v kontaktu s chlazenými bateriovými články. Druhým chladivem je tekutina, která podstupuje fázovou přeměnu¹ (propan, oxid uhličitý, vhodné haloalkany) a která je v kontaktu pouze s glykolovou směsí. Výhodou takového systému je možnost využití glykolového okruhu v rámci celého elektromobilu i mimo bateriový systém, například jako chlazení pro elektromotor nebo pro elektrické měniče. Dle potřeby lze glykolové okruhy v elektromobilu spojovat/rozpojovat pomocí systému ventilů, díky čemuž lze v případě potřeby ohřevu bateriových článků využívat odpadní teplo z elektromotoru a měničů pro ohřev glykolu; naopak v případě vysokých teplot lze okruhy oddělit a chladit primárně bateriový systém.

Zjednodušené schéma takového provedení můžeme vidět na obrázku 2.1 níže.



Obrázek 2.1, dvouokruhové aktivní chlazení

¹ Tato fázová přeměna nebude předmětem zkoumání této práce. Je zřejmé, že při absorpci tepla se v případě výše zmíněných chladicích tekutin jedná o přeměnu kapaliny na plyn, zatímco níže zmíněné PCM se využívají při fázové změně z pevné látky na kapalinu.

2.4 Chlazení pomocí materiálů s fázovým přechodem

Jedním ze způsobů, jak odvést teplo z bateriového článku, je využití fázové přeměny hmoty v přímém kontaktu s článkem za absorpce skupenského tepla. Substanci, jejíž teplota fázové přeměny vyhovuje požadavkům na chladicí soustavu, budeme nazývat materiál s fázovým přechodem (PCM, phase change material).

2.4.1 Vlastnosti materiálů s fázovým přechodem

Vymežeme si nejprve vlastnosti PCM materiálu vhodného pro naši aplikaci, jelikož pouhý fázový přechod jest vlastností vícero známých materiálů. Zaměříme se proto na organické PCM; konkrétněji parafíny, a to především z důvodu jejich nízké reaktivity při kontaktu s kovy [18]. Klíčovými parametry parafínů jsou pak měrné skupenské teplo tání l (přibližně 200 kJ/kg) [20], měrná tepelná kapacita c (běžně okolo 2,4 kJ kg⁻¹ K⁻¹) [21] a teplota tání v požadovaném rozmezí (25 ÷ 40) °C [20]. Nevýhodou organických PCM materiálů je nižší měrná tepelná vodivost λ , která v případě čistých parafínů nepřesahuje 1 W m⁻¹ K⁻¹ [21], což je značnou nevýhodou v porovnání s kovy, které se v chladicích systémech používají jako médium pro přenos tepla. Srovnáme-li měrnou tepelnou vodivost PCM například s hliníkem, tak jde 2000krát nižší hodnotu λ . Možným řešením je využití kompozitních materiálů, které PCM využívají ať už jako výztuž či jako výplň. V případě, kdy je parafín výplní, lze jako výztuž využít materiál s vyšší tepelnou vodivostí. Příkladem takové výplně může být grafen, kovová vlákna nebo kovová síťka, přičemž vyhovujícím kovem může být měď či hliník. Tepelnou vodivost lze s využitím výplně zvýšit o jeden řád, jde však stále o 200krát nižší vodivost než v případě použití hliníkového tepelného vodiče [11].

Cílem simulací v dalších kapitolách bude posouzení využitelnosti parafínů pro chlazení lithiových akumulátorů v bateriovém modulu. Prozatím se zdá, že jednak z důvodu nižší teplotní vodivosti, tak i z potřeby přeměny kapalně fáze zpět do pevné fáze je použití PCM jako jediného chladicího prvku spíše speciálním než univerzálním řešením pro aplikaci v elektromobilitě. Lze se proto domnívat, že PCM nalezne využití především v kombinaci s aktivním chladicím okruhem se schopností chlazení ve větším teplotní rozsahu.

KAPITOLA 3: MODEL CHLAZENÍ BATERIOVÉHO MODULU

3.1 Modelování v prostředí COMSOL

Sestavení modelu a následné simulace budou prováděny v aplikaci COMSOL Multiphysics verze 6.1.

Model využívá předdefinované knihovny Battery design module a Multiphysics pro snadnější zadání parametrů a rovnic potřebných pro výpočet. Vypisování všech rovnic, které v simulaci figurují, by bylo pro tento projekt neúčelné, proto budou v dalších sekcích popsány pouze parametry či rovnice nastavené/uzivatelsky upravené uživatelem a okrajové podmínky simulace.

3.2 Model lithiového akumulátoru

Stanovme si nejprve typ a vlastnosti bateriového článku, pomocí kterého budeme teplotní management zkoumat. Vybraným bateriovým článkem nechť je Samsung SDI o náboji 94 Ah. Jde o prismatický článek s katodou NMC, který bychom našli v automobilech BMW i3 či VW e-Golf jako primární článek bateriového systému [22]. Parametry bateriového článku jsou vypsány v tabulce 3.1 níže.

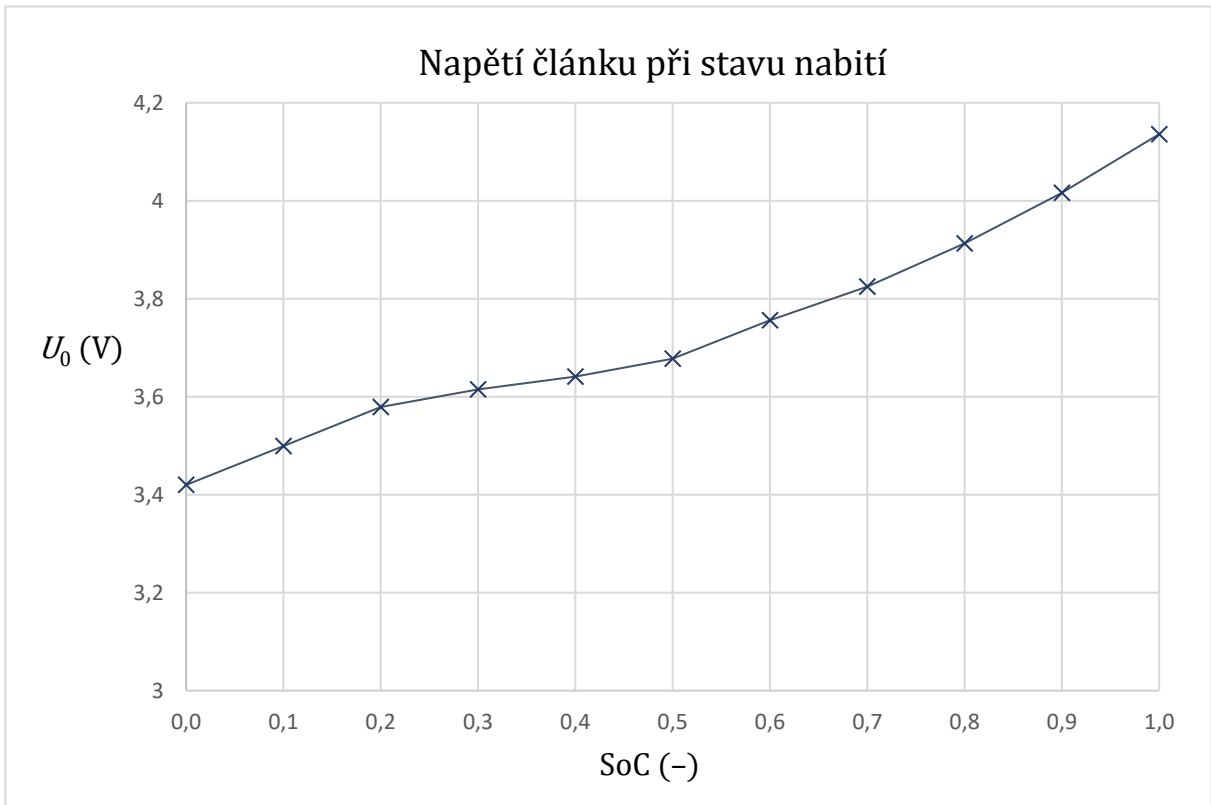
Jmenovité napětí	3,68	V
Rozsah provozního napětí	(2,75 ÷ 4,15)	V
Jmenovitý náboj	94	Ah
Energie	350	Wh
Jmenovitý proud	31	A

Tabulka 3.1, parametry článku

3.3 Napětí naprázdno

Vlastnosti svorkového napětí COMSOL definuje pomocí napětí naprázdno U_0 , které je zadáno jako funkce $U_0 = f(\text{SoC})$ při referenční teplotě, kde SoC znamená stav nabití článku (State of charge). Závislost svorkového napětí U_0 na stavu nabití je získána z experimentálně naměřených dat, která jsou uvedena v dokumentaci SAMSUNG SDI 94 Ah [23].

Závislost U_0 na stavu nabití při teplotě 25 °C (osa napětí nezačíná od nuly) bez proudové zátěže:

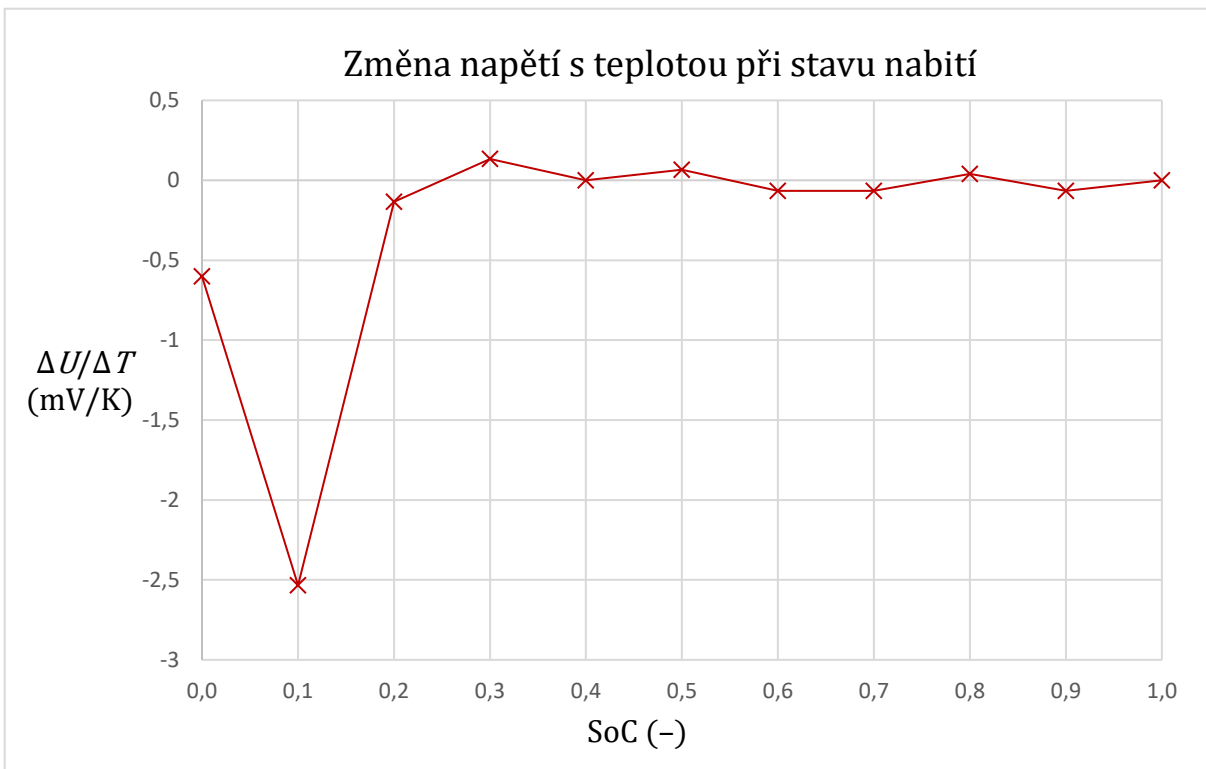


Graf 3.1

Protože se svorkové napětí při různých stavech nabití mění s teplotou, je dalším vstupním parametrem závislost $dU_0(T)/dT$, tedy jakým způsobem se napětí naprázdno mění s teplotou při určitém stavu nabití. Funkce není explicitně uvedena v [23], ale je zde uvedena tabulka s napětím vůči SoC při určitých teplotách. Hodnoty jsou spočítány jako

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta T} = \frac{U_0(25\text{ °C}) - U_0(40\text{ °C})}{(25 - 40)\text{ °C}} \quad (1)$$

a jsou zobrazeny níže na grafu 3.2.



Graf 3.2

3.3.1 Polarizace elektrod

Dalším parametrem článku je jeho polarizace η , $[\eta] = V$ (také nazývána jako přepětí, ačkoli svorkové napětí článku při polarizaci klesá, je-li článek využívám jako elektrický zdroj). Při proudové zátěži dochází k narušení elektrodového potenciálu E_0 , což se projevuje úbytkem napětí na svorkách elektrod.

Procesy podílející se na celkové polarizaci článků můžeme rozlišit dle jejich příčiny; těmi hlavními procesy jsou:

- Ohmická polarizace, která je způsobena elektrickým odporem elektrod, elektrolytu, separátoru a SEI vrstvy. Do COMSOL se tato polarizace zadává se jako hodnota přepětí η při zatížení článku proudem o velikosti 1C.
- Koncentrační polarizace (také difúzní polarizace), která je vyvolána nižší rychlostí transportu iontů přes elektrolyt vůči vyšší rychlosti pohybu elektronů vně článku. Nepoměrná rychlost se projevuje úbytkem napětí na svorkách. Zadávanou veličinou charakterizující koncentrační polarizaci je relaxační doba τ , která určuje, za jaký čas se článek dostane do ustáleného stavu po odpojení elektrické zátěže [24].
- Aktivační polarizace η_A . Tato polarizace nastává při nedostatečné rychlosti elektrodových dějů. Rychlost této reakce se vyjadřuje pomocí proudové hustoty j . Tato proudová hustota vychází z výměnné proudové hustoty j_0 , odpovídající vnitřní výměně náboje v rámci katodových reakcí při rovnovážném potenciálu φ_0 .

Proudovou hustotu elektrodového proudu j lze vyjádřit pomocí Butlerovy-Volmerovy rovnice a ohmické přepětí lze charakterizovat odporem pro přenos náboje R_d [25]. Nevýhodou je, že

do ani jedné rovnice nejsme schopni dosadit všechny veličiny. Například pro výpočet odporu R_d musíme znát celkový efektivní povrch elektrody, který nám v případě simulovaného prismatického článku není znám a ani není možné kvůli neveřejnému výrobnímu procesu článku tento povrch odhadnout.

Jediným možným řešením je odečíst z naměřených hodnot v [23] celkový napěťový úbytek článku při proudové zátěži 1C a jednotlivé složky polarizace neodlišovat. Teplotní závislost této polarizace zjednodušíme na Arrheniův vztah

$$f(T) = f(T_0) \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (2)$$

ve kterém E_a je aktivační energie chemické reakce při referenční teplotě T_0 , R je molární plynová konstanta, teplota T je v našem případě průměrná teplota článků a $f(T_0)$ bude hodnota dosazované veličiny (úbytek napětí) při referenční teplotě 25 °C. Za aktivační energii budeme z důvodu nerozlišování jednotlivých reakcí dosazovat efektivní aktivační energii, za kterou v našem případě dosadíme aktivační energii potřebnou pro zahájení elektrodových dějů při zátěži. Pro NMC článek byla experimentálně naměřena hodnota $E_a = 45 \text{ kJ mol}^{-1}$ [25, 26]. Úbytky článku jsou odečteny jako $\Delta V = f(\text{SOC})$ jak při nabíjení, tak při vybíjení článku. V simulovaném SOC od 20 % do 80 % se hodnoty se pohybují v intervalu $\Delta V = (91 \div 187) \text{ mV}$ při proudu 1C (94 A). Arrheniova rovnice má opačné znaménko z důvodu, že zdánlivý odpor článku s rostoucí teplotou na námi simulovaném rozsahu teplot klesá [27].

3.3.2 Pokles kapacity baterie

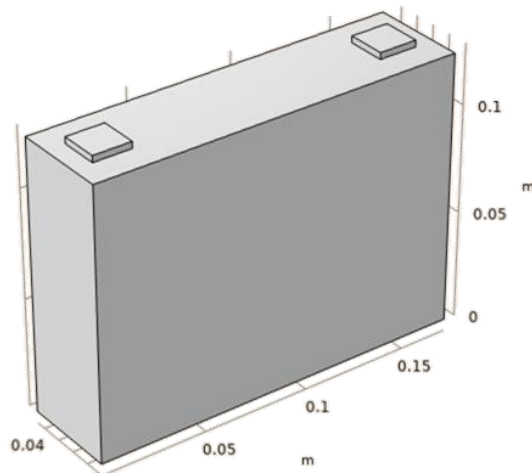
V modelu nebudeme simulovat chemické procesy podílející se na poklesu kapacity článku, objekt Capacity fade využívá obdobné zjednodušení jako v případě teplotní závislosti polarizace. Veličinou určující teplotní degradaci je efektivní aktivační energie tepelných reakcí, tedy energie $E_a = 32,2 \text{ kJ mol}^{-1}$ [28].

Degradace zahrnuté obecným užíváním baterie budeme uvažovat pouze pomocí konstanty H , která udává pokles kapacity během jednoho cyklu. Konstantu můžeme odečíst z tabulky v dokumentaci k SAMSUNG SDI 94 Ah [23], ve které je uvedena hodnota 0,2 na 4600 cyklů při teplotě 25 °C, takže podílem dostaneme $H \cong 4,35 \cdot 10^{-5}$.

Posledním zadávaným parametrem je časová degradace materiálu, která je definována dobou, za jakou baterie samovolně ztratí kapacitu při nečinnosti (calendar aging). Tento parametr je zapotřebí zadat v případě, že při simulaci opakovaných cyklů je mezi cykly nastavena pauza (resting period). Zadanou hodnotou je v našem případě $\tau = 85$ let na ztrátu celé kapacity. Údaj je vypočítán z tabulky v [23], ve které je uvedeno, že testovací článek při 25 °C a při 100% stavu nabití poklesl za 17 let na 80 % své původní kapacity. Je zřejmé, že výpočet přímou úměrou je velmi hrubým odhadem a slouží pouze jako parametr (který jiným způsobem zadat nelze) pro COMSOL. Dobou vyčerpání celého využitelného náboje článku se zabývat nebudeme, takže si tento odhad můžeme dovolit.

3.3.3 Geometrie článku

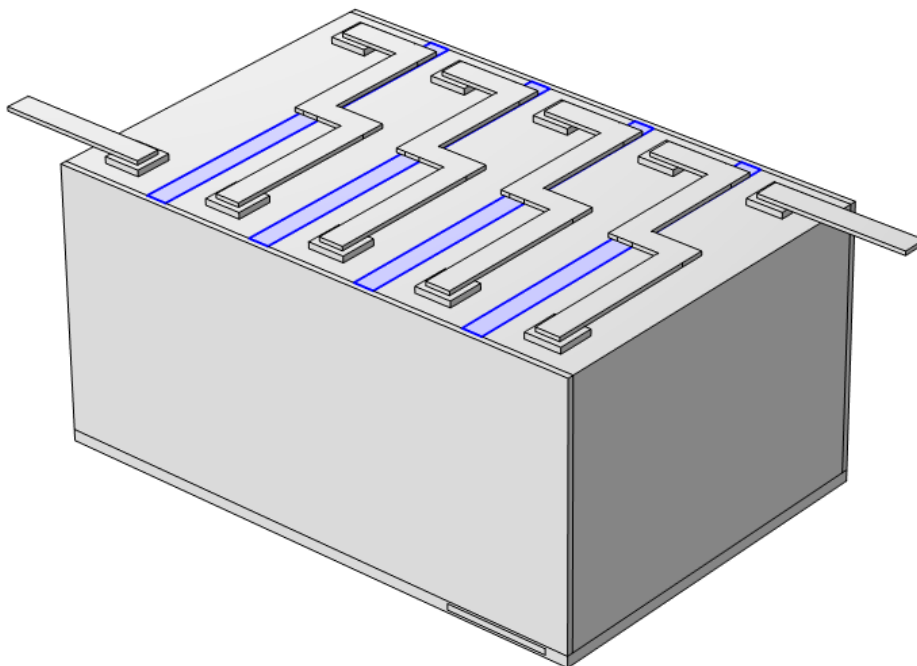
Rozměry článku jsou identické s prismatickým článkem Samsung SDI 94 Ah, dle naznačené osy podél obrázku je šířka $x = 173$ mm, tloušťka $y = 45$ mm a výška $z = 125$ mm [23]. Elektrody jsou na článku rozmístěné symetricky a nejsou dle rozměrů odlišitelné. V modelu je za kladnou elektrodu považován konektor umístěný blíže k počátku souřadnicového systému.



Obrázek 3.1, geometrie jednoho článku

3.4 Akumulátory v sérii

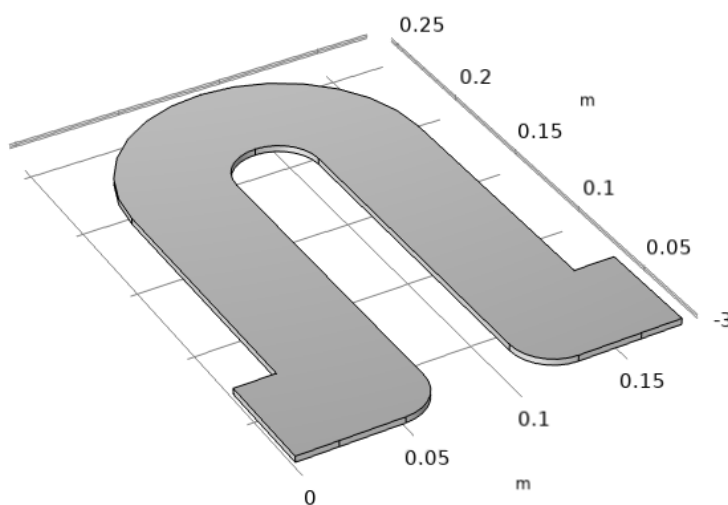
Teplotní zátěž budeme testovat na pěti bateriových článcích zapojených do série. Na spodní straně (na obrázku 3.2) vidíme hliníkový chladič se vstupem pro glykolový okruh. Po stranách článků je umístěno hliníkové pouzdro reprezentující „obal“ bateriového modulu. Vodiče, které články spojují do série jsou rovněž z hliníku. Bloky PCM (modře vyznačené) jsou umístěny mezi bateriovými články.



Obrázek 3.2, simulovaný bateriový modul

3.5 Glykolový okruh

Funkci aktivního chlazení simuluje hliníkový plát protékáný glykolem. Vstupní teplota glykolu je po celý proces neměnná (ohřev celého chladicího okruhu se zanedbává). Počáteční teplota chladicí kapaliny bude v simulacích identická s teplotou ϑ_0 . Hodnotu průtoku kapaliny v chladicím okruhu bateriového systému můžeme stanovit jako 20 l min^{-1} . Z důvodu zkrácení výpočetního času simulace průtoku kapaliny budeme tento tok zadávat jako rozdíl tlaků, který je potřebný pro překonání vnitřního tření kapaliny a tření kapaliny s okraji potrubí (Poiseuillův zákon proudění viskózní kapaliny). Tento rozdíl tlaků získáme jednoduše simulací samotného spodního plátu bez ostatních komponent, který je protékán glykolem o průtoku 20 l min^{-1} . Vypočítaný rozdíl tlaků činil $0,45 \text{ kPa}$, takže zadávanou hodnotou bude pro každou další simulaci tento rozdíl tlaků na vstupu a výstupu chladicího potrubí. Na obrázku 3.3 vidíme simulovanou část potrubí protékanou ethylen-glykolem, hliníkový plát je „zprůhledněn“.



Obrázek 3.3, geometrie chladicího okruhu

3.6 Materiál s fázovým přechodem

3.6.1 Parametry PCM materiálu

Testovat budeme směs parafínu, jehož základním alkanem je nonadekan. Natavené parametry parafínu tak jsou

1. teplota tání $\vartheta_t = 32 \text{ }^\circ\text{C}$,
2. měrná tepelná kapacita v pevné fázi $c_1 = 1,91 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$,
3. měrná tepelná kapacita v kapalně fázi $c_2 = 1,80 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$,
4. hustota pevné fáze $\rho_1 = 782 \text{ kg m}^{-3}$,
5. hustota kapalně fáze $\rho_2 = 789 \text{ kg m}^{-3}$,
6. součinitel tepelné vodivosti pevné fáze $\lambda_1 = 0,210 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$,
7. součinitel tepelné vodivosti kapalně fáze $\lambda_2 = 0,152 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$,
8. skupenské teplo tání $l = 222 \text{ kJ kg}^{-1}$. [29–31]

3.6.2 Simulace tání PCM

Chladicí výkon PCM budeme simulovat pomocí metody efektivní tepelné kapacity, která spočívá na úpravě rovnic popisujících vedení tepla.

Pro homogenní materiál můžeme vedení tepla v jedné souřadnicové ose x popsat pomocí rovnice

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (3)$$

Bude-li se jednat o homogenní izotropní materiál, můžeme rovnici jednoduše rozepsat pro všechny osy, tedy

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T, \quad (4)$$

což lze jednodušeji zapsat jako

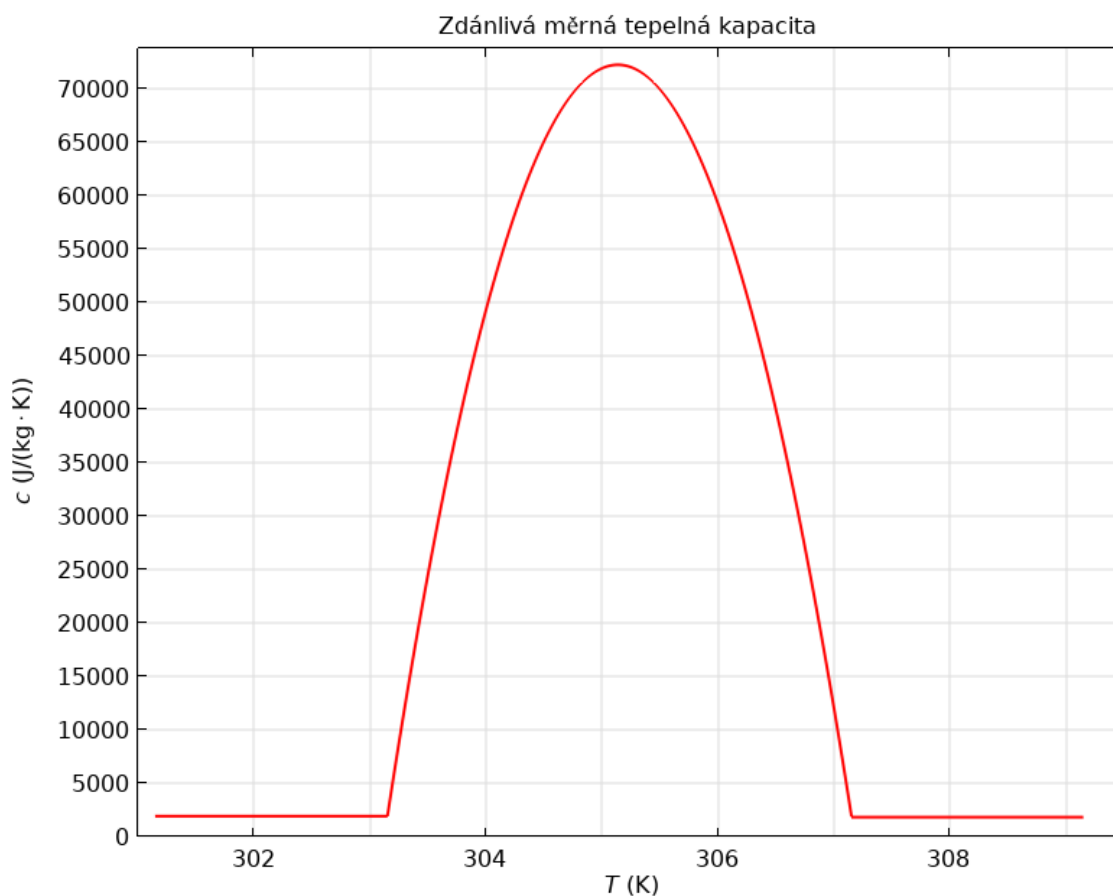
$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2(T). \quad (5)$$

Z názvu metody efektivní tepelné kapacity je zřejmé, že tepelná kapacita c nebude po celý průběh konstantní. Proto namísto konstanty c použijeme funkci $c_p(T)$, která bude reprezentovat absorpci tepla při tání.

Funkce $c_p(T)$ je přejata z materiálů COMSOL Heat transfer module [32] ve tvaru

$$c_p(T) = \frac{1}{\rho_p} \left(\theta(T) \cdot \rho_1 \cdot c_1 + (1 - \theta(T)) \rho_2 \cdot c_2 \right) + l \frac{d\alpha(T)}{dT}. \quad (6)$$

Graf průběhu tepelné kapacity $c_p(T)$ PCM materiálu v závislosti na teplotě T :



Graf 3.3

Funkce $\theta(T)$ vyjadřuje skupenský stav materiálu, obor hodnot funkce je $[0; 1]$. Hodnota 1 znamená úplně tuhoun substanci, hodnota 0 znamená zcela kapalnoun substanci, přičemž tento přechod leží v intervalu ΔT , jehož střed je v teplotě tání materiálu.

Funkce ρ_p znamená efektivní hustotu celé substance během procesu tání,

$$\rho_p = \theta \rho_1 + (1 - \theta) \rho_2. \quad (7)$$

Pomocná funkce $\alpha(T)$ reprezentuje rozdělení hustoty ve fázi přeměny,

$$\alpha(T) = \frac{1}{2} \left(\frac{\theta \rho_1 - (1 - \theta) \rho_2}{\rho_p} \right). \quad (8)$$

Protože se během tání projeví odlišná tepelná vodivost pevné a kapalné fáze PCM, zavedeme ještě efektivní součinitel tepelné vodivosti λ_p obdobně jako u efektivní hustoty, tedy

$$\lambda_p = \theta \lambda_1 + (1 - \theta) \lambda_2.$$

Reprezentativní rovnice pro model tání je pak ve tvaru

$$\rho_p(T) \cdot c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_p \nabla^2(T). \quad (9)$$

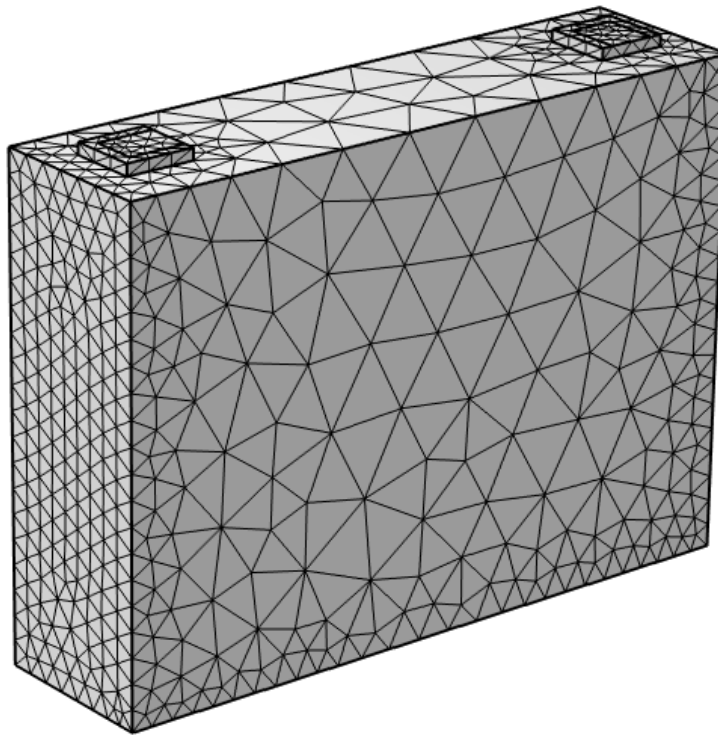
3.7 Vliv počtu elementů na výsledky simulace

Jedním z nutných kroků k aplikaci metody konečných prvků na zkoumanou fyzikální soustavu, kterou popisují prostorově a časově závislé diferenciální rovnice, je diskretizace zkoumané spojité oblasti Ω na n počet elementů Ω_i (konečných prvků), přičemž platí, že

$$\sum_{i=1}^n \Omega_i \cong \Omega, \quad \sum_{j=1}^m \Gamma_j \cong \Gamma, \quad (10)$$

kde Γ je spojitá hranice zkoumané soustavy (v našem případě jde o povrch tělesa) a Γ_j je hranice jednoho okrajového elementu. Jeden element má tvar nepravidelného čtyřstěnu, takže součet jejich objemů nemusí být totožný s objemem zkoumané oblasti (a totéž platí pro hranici).

Soustava všech elementů reprezentujících zkoumanou soustavu se nazývá síť konečných prvků (Mesh).



Obrázek 3.4, síť konečných prvků na bateriovém článku

Na této polygonové oblasti Ω je v případě fyziky vedení tepla (uved'me příklad v homogenním anizotropním a stacionárním prostředí) řešena tzv. variační identita jako rovnost funkcionalů a, b

$$a(T, v) = b(v), \quad (11)$$

$$\int_{\Omega} \lambda \vec{\nabla}(T) \cdot \vec{\nabla}(v) \, dV = \int_{\Omega} -\lambda \nabla^2(T) \cdot v \, dV + \int_{\partial\Omega} \lambda \vec{\nabla}(T) \cdot \vec{n} \cdot v \, dS, \quad (12)$$

přičemž T je hledaná funkce teploty, pro kterou je funkcionál stacionární (nejčastěji minimální), \vec{n} je jednotkový vektor hranice oblasti a v je testovací funkce. Funkce teploty T v konkrétním bodě je počítána jako lineární kombinace bázových funkcí ψ_i s parametry T_i , které se vztahují k uzlům elementů (čtyřstěnů) a v bodě uzlu jsou rovny funkční hodnotě T . Rozvoj funkce T do aproximované $T_h \cong T$ spočívá ve vztahu

$$T_h = \sum_i T_i \psi_i, \quad (13)$$

přičemž obdobně jsou testovací funkce v nahrazeny bázovými funkcemi ψ_j , takže množina bázových a testovacích funkcí je identická. Bázová funkce ψ konkrétního uzlu je lineární funkce, která v tomto bodě dosahuje hodnoty 1 a je definována jen na nejbližším okolí; v ostatních uzlech má hodnotu 0. Všechny uzlové parametry T_i tvoří dohromady vektor $\vec{T} = (T_1, T_2, \dots, T_n)$, přičemž hodnoty T_i musí být počítány, pokud nejde o známou (např. okrajovou) hodnotu. Řešení metodou konečných prvků spočívá ve výpočtu soustavy rovnic, kterou lze vyjádřit jako

$$\mathbf{A} \cdot \vec{T} = \vec{b}, \quad (14)$$

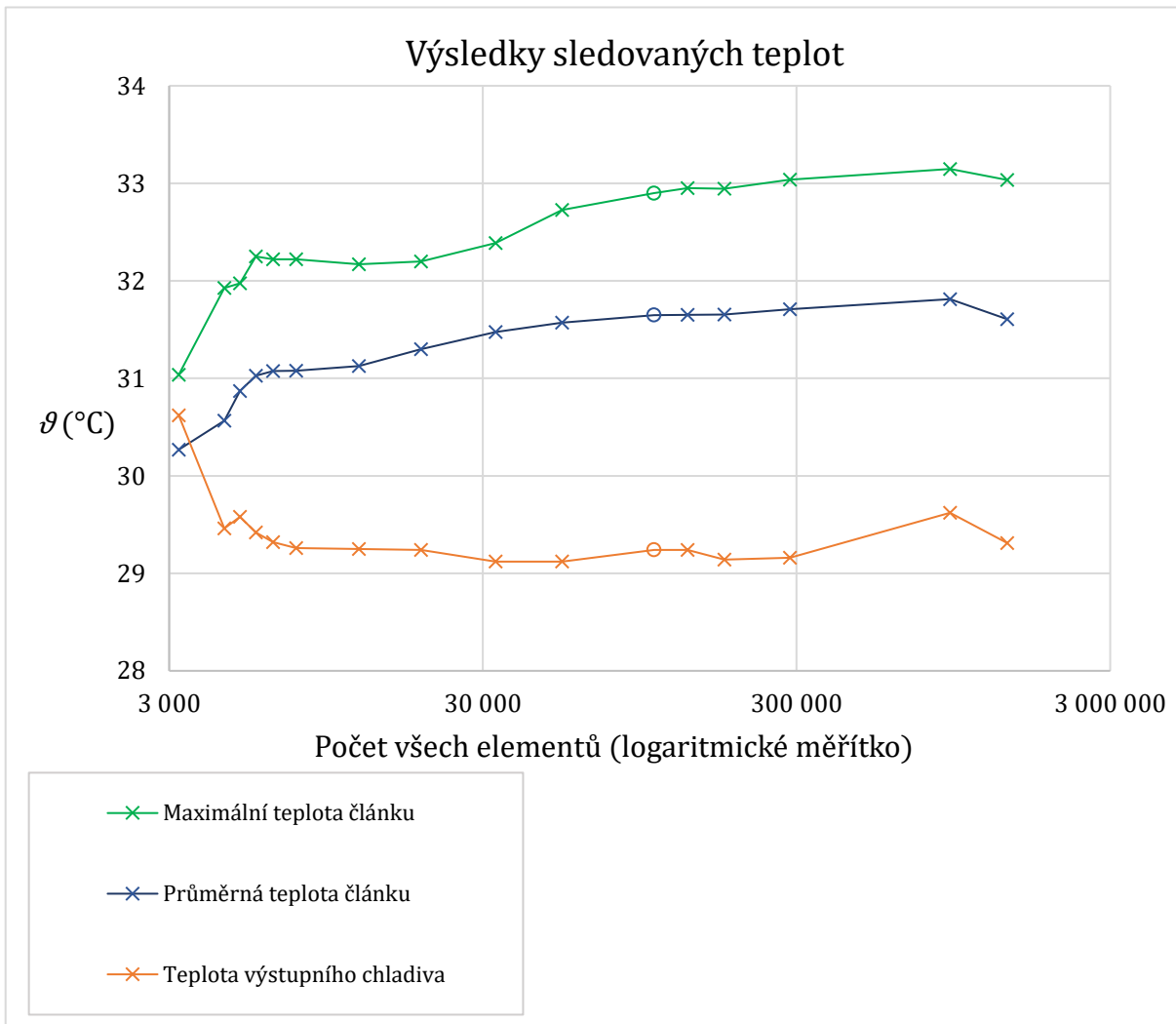
ve které \mathbf{A} je matice obsahující koeficienty pro všechny bázové funkce $\psi_{i,j}$ (z historických důvodů nazývána jako matice tuhosti), prvky vektoru \vec{b} jsou získány z funkcionálu $b(v)$ vyjádřeného pomocí koeficientů teplot T_i a bázových funkcí ψ_i, ψ_j .

Z podstaty metody konečných prvků lze dovodit, že úroveň diskretizace modelu na oblasti Ω má vliv na řešení počítané úlohy. Hrubší síť konečných prvků má za následek větší diskretizační chybu (a v extrémních případech řešení úlohy neexistuje, protože počítané funkcionály nemají konvergentní řešení); příliš jemná síť konečných prvků zabírá kvůli většímu počtu řešených rovnic zbytečně dlouhý výpočetní čas, který ve výsledku nepřináší užitečnější výsledky než výpočetní čas při vhodně zvolené diskretizaci.

Úlohou je tedy najít takovou úroveň diskretizace, po jejíž překročení již nedochází k výkyvům výsledků simulace. Na grafu 3.4 jsou vyneseny vypočítané teploty článků, které jsou stěžejními veličinami pro tuto práci. Pro kontrolu byly zapisovány i teploty spočítané na výstupu chladicího potrubí. Sledování diskretizační chyby bylo provedeno na bateriovém modulu s fyzikou tání PCM a s fyzikou chladicího okruhu s parametry jako v simulaci z části 4.1; odlišným parametrem byly zadávané hodnoty polarizace článku, které nezahrnovaly Arrheniovu závislost ohmické polarizace na teplotě, proto se teploty od výsledků ve čtvrté kapitole mírně odlišují.

Z grafu je patrné, že po jistém počtu elementů se hodnota konečných teplot ustálí, ačkoli se i nejhrubší síť konečných prvků nijak drasticky neodchyluje (6% relativní odchylka) od teplot při největším počtu elementů. Lze se proto domnívat, že teplotní funkce T_h je vůči stupni diskretizace málo citlivou veličinou. Nejmenší simulovaný počet elementů je 3218, při nižším počtu elementů se již nepodařilo funkci T_h nalézt.

Za uspokojivě přesnou simulaci můžeme považovat simulaci s nejméně 105 374 elementy (v grafu odlišeno kolečkem), přičemž prezentované výsledky jsou počítány na modelu (se stejnou fyzikou a geometrií) s 134 882 prvky.



Graf 3.4

KAPITOLA 4: SIMULACE CHLAZENÍ

V této kapitole budeme zkoumat vliv materiálů s fázovým přechodem na teplotu simulovaného bateriového modulu při rychlém nabíjení článků.

Zadávané parametry:

1. Výměna s okolím probíhá ve všech modelech přes boční hliníkové pláty s koeficientem přestupu tepla $\alpha = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (v simulacích standartně používaná velikost konstanty [33, 34]), v modelech s chladicím okruhem je teplo z modulu ještě odváděno konvekcí chladicí kapaliny.
2. Počáteční teplota celého modulu je nastavena na teplotě $\vartheta_0 = 20 \text{ °C}$ a v druhém porovnání na $\vartheta_0 = 26 \text{ °C}$.
3. V modelech s aktivním chlazením je teplota chladiče v glykolovém okruhu vždy identická s počáteční teplotou ϑ_0 , ohřev celého okruhu se neuvažuje. Vstupní teplota chladiče je proto po celou dobu simulace konstantní.
4. Počáteční stav nabití všech akumulátorů je 20 % a jsou dobíjeny na hodnotu 83,4 % proudem 131,6 A (1,4C), což odpovídá době 1 600 s.

Velikost proudu 1,4C, kterým je modul nabíjen, je odhadnuta z údajů v [35] při rychlém nabíjení vozu BMW i3 (s 94Ah bateriovým systémem) průměrným výkonem 46 kW, což přibližně odpovídá nabíjení proudem o průměrné velikosti 131,4 A.

Podívejme se v následujících kapitolách na výsledky simulací, které byly provedeny na bateriových modulech

1. bez jakéhokoli chladicího prvku,
2. pouze s PCM,
3. pouze s glykolovým chlazením,
4. s glykolovým chlazením a s PCM.

4.1 PCM v pasivním chlazení

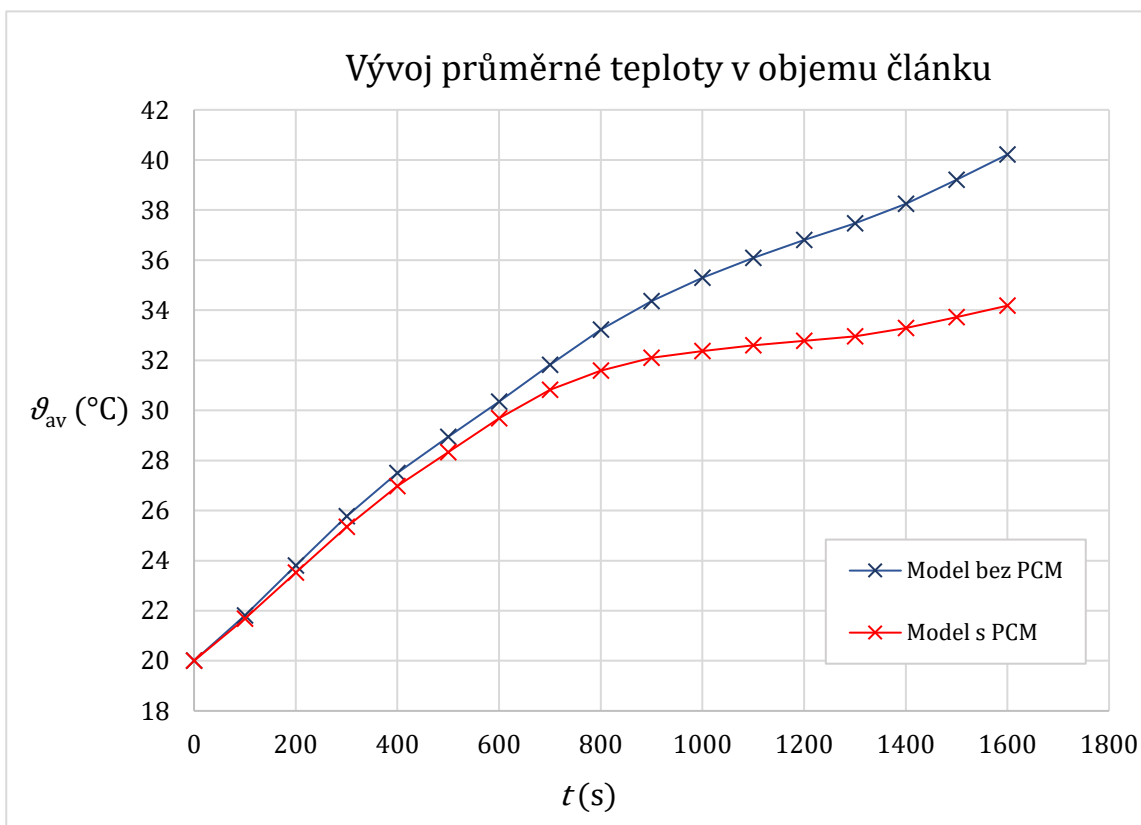
4.1.1 Srovnání teplot modulů při počáteční teplotě 20 °C

Tabulka vybraných hodnot znázorňuje teploty ϑ při procesu nabíjení. Teplota ϑ_{av} znamená průměrnou teplotu v objemu článku, ϑ_{max} označuje maximální teplotu v článku:

Model bez PCM			Model s PCM		
t (s)	ϑ_{av} (°C)	ϑ_{max} (°C)	t (s)	ϑ_{av} (°C)	ϑ_{max} (°C)
0	20,0	20,0	0	20,0	20,0
600	30,4	31,9	600	29,7	31,4
1000	35,3	36,9	1000	32,4	34,5
1600	40,2	41,8	1600	34,2	36,4

Tabulka 4.1

Graf průběhu průměrných teplot ϑ_{av} :



Graf 4.1

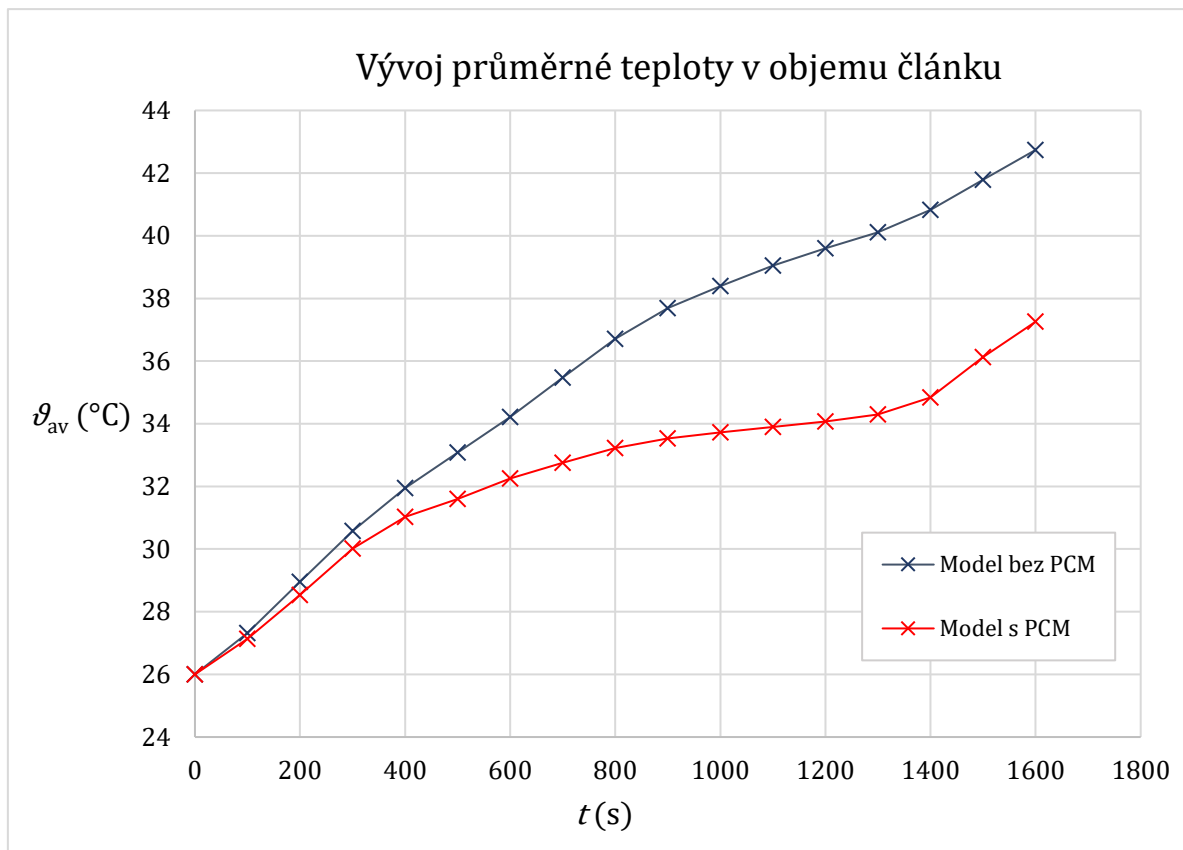
4.1.2 Srovnání teplot modulů při počáteční teplotě 26 °C

Tabulka teplot při nabíjení:

Model bez PCM			Model s PCM		
t (s)	ϑ_{av} (°C)	ϑ_{max} (°C)	t (s)	ϑ_{av} (°C)	ϑ_{max} (°C)
0	26,0	26,0	0	26,0	26,0
600	34,2	35,8	600	32,3	34,1
1000	38,4	40,0	1000	33,7	35,9
1600	42,7	44,4	1600	37,3	38,9

Tabulka 4.2

Graf průběhu průměrných teplot ϑ_{av} :



Graf 4.2

4.2 Kombinace PCM s aktivním chlazením

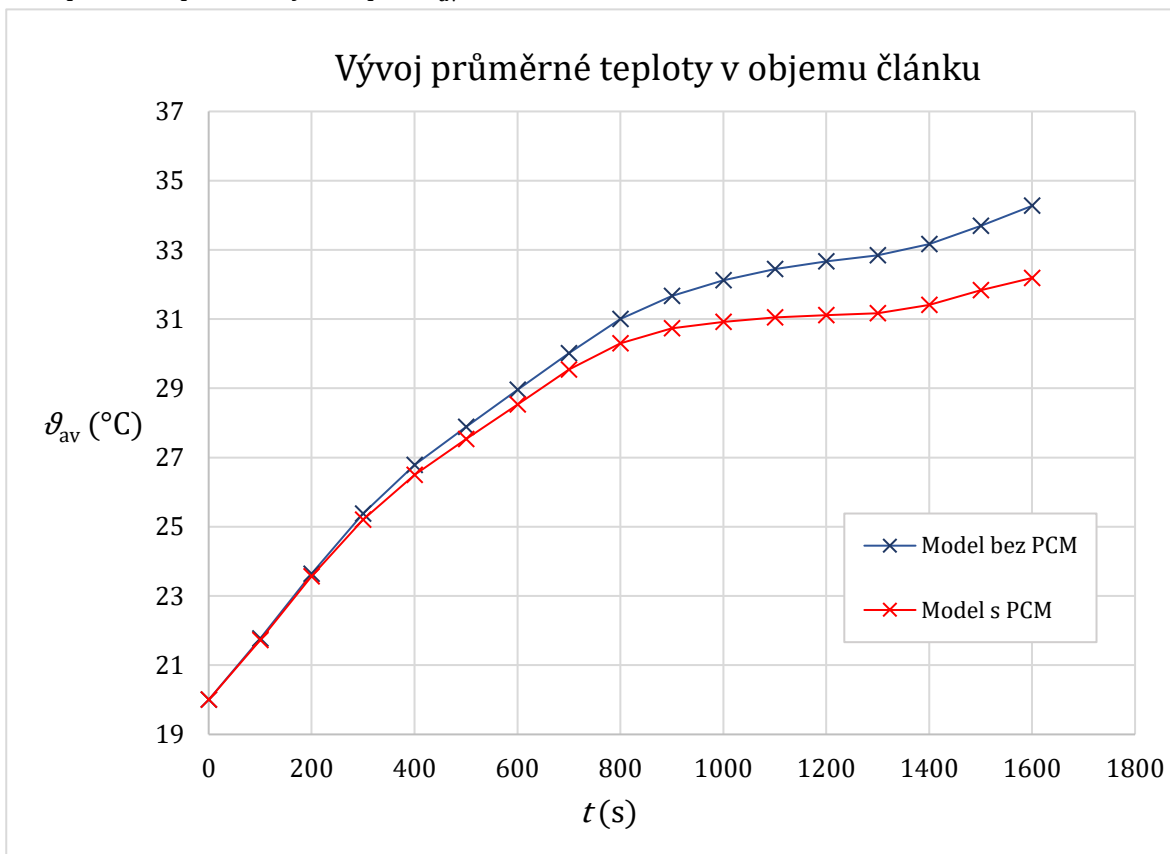
4.2.1 Srovnání teplot modulů při počáteční teplotě 20 °C

Tabulka teplot při nabíjení:

Model bez PCM			Model s PCM		
t (s)	ϑ_{av} (°C)	ϑ_{max} (°C)	t (s)	ϑ_{av} (°C)	ϑ_{max} (°C)
0	20,0	20,0	0	20,0	20,0
600	29,0	31,3	600	28,5	31,0
1000	32,1	35,1	1000	30,9	33,8
1600	34,3	37,5	1600	32,2	35,4

Tabulka 4.3

Graf průběhu průměrných teplot ϑ_{av} :



Graf 4.3

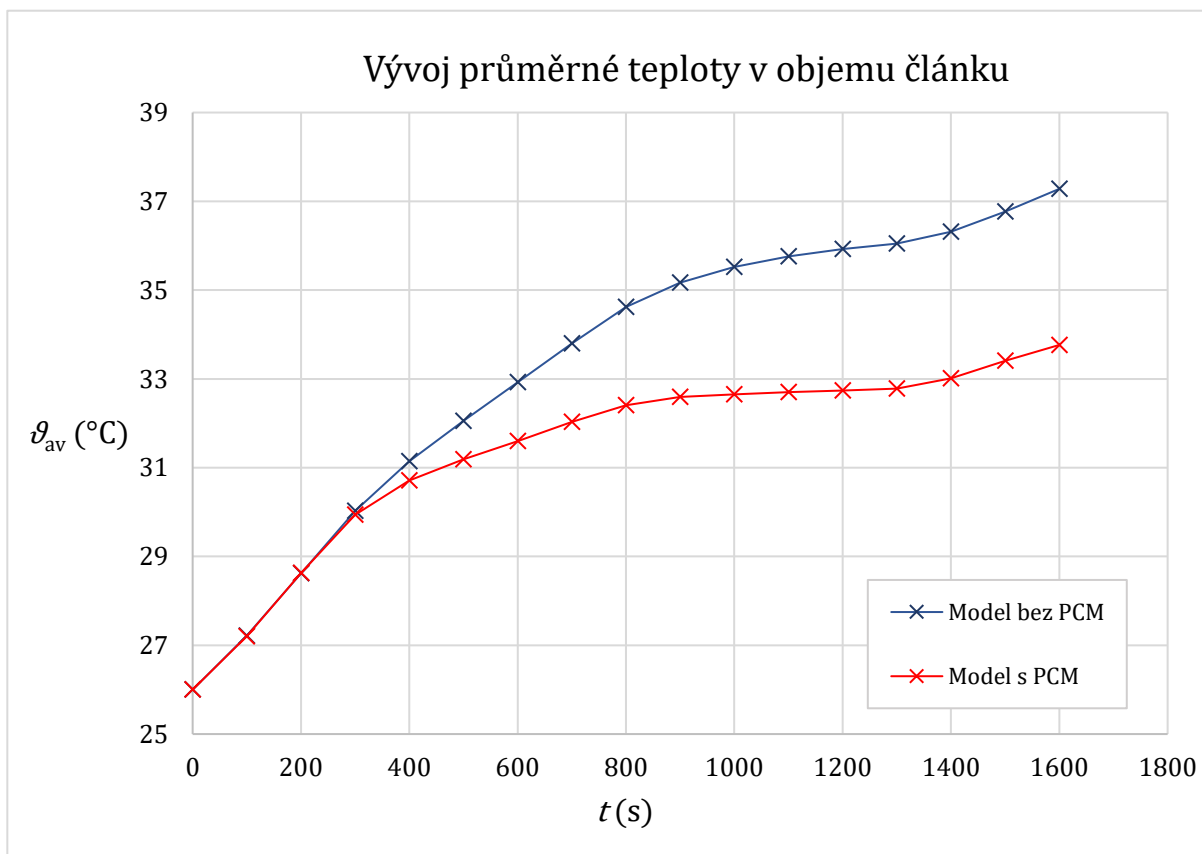
4.2.2 Srovnání teplot modulů při počáteční teplotě 26 °C

Tabulka teplot při nabíjení:

Model bez PCM			Model s PCM		
t (s)	ϑ_{av} (°C)	ϑ_{max} (°C)	t (s)	ϑ_{av} (°C)	ϑ_{max} (°C)
0	26,0	26,0	0	26,0	26,0
600	32,9	35,2	600	31,6	34,0
1000	35,5	38,2	1000	32,7	35,3
1600	37,3	40,3	1600	33,8	36,7

Tabulka 4.4

Graf průběhu průměrných teplot ϑ_{av} :



Graf 4.4

4.3 Porovnání aktivního a pasivního chlazení

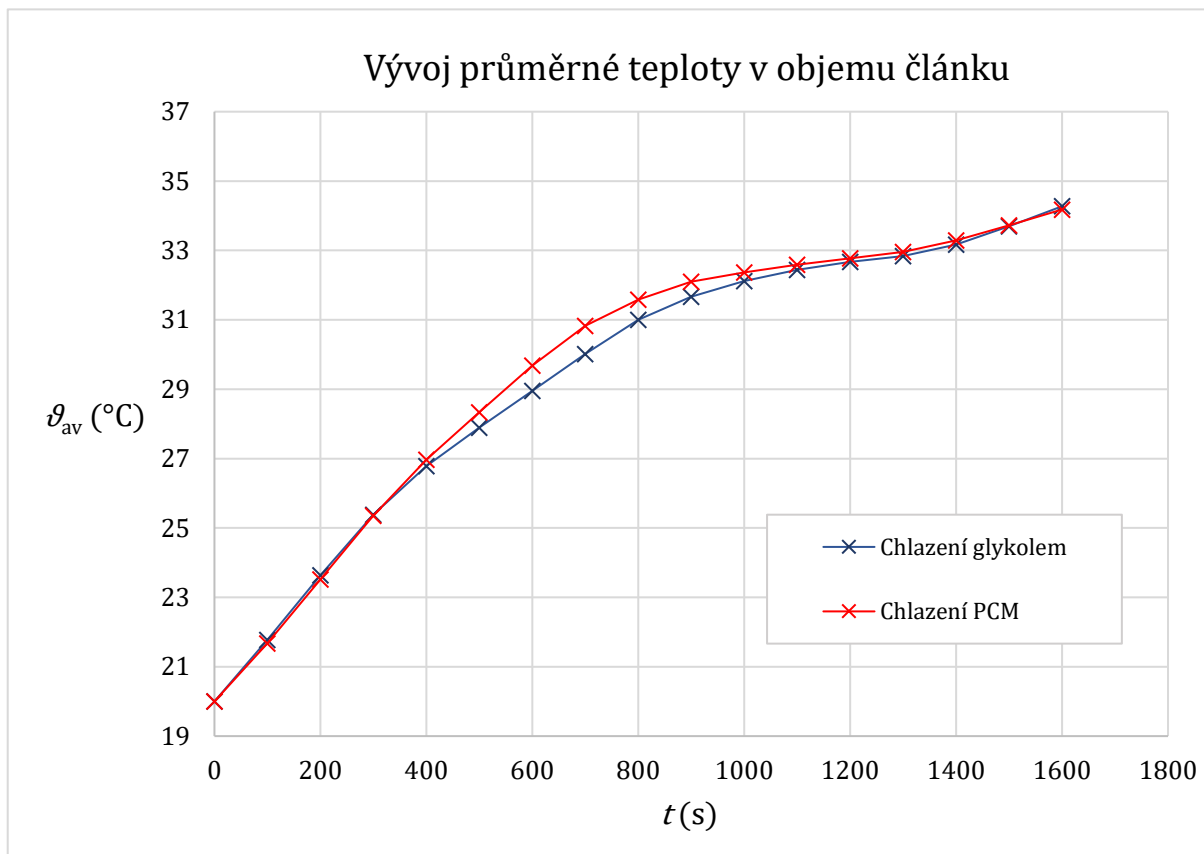
Podívejme se ještě na srovnání teplot článků v modulu s chladicím okruhem (pouze chlazení glykolem) a teplot v modulu chlazeného pouze s PCM.

Tabulka teplot při nabíjení s počáteční teplotou 20 °C:

Chladicí okruh			Pasivní s PCM		
t (s)	ϑ_{av} (°C)	ϑ_{max} (°C)	t (s)	ϑ_{av} (°C)	ϑ_{max} (°C)
0	20,0	20,0	0	20,0	20,0
600	29,0	31,3	600	29,7	31,4
1000	32,1	35,1	1000	32,4	34,5
1600	34,3	37,5	1600	34,2	36,4

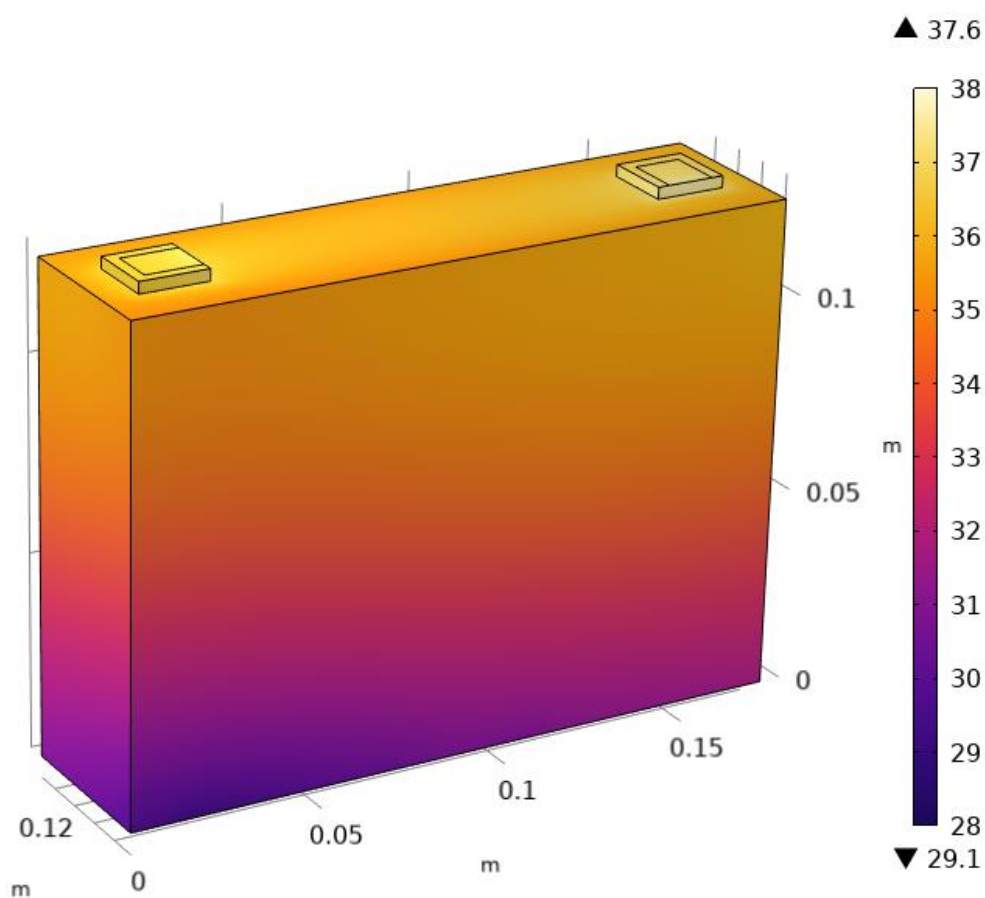
Tabulka 4.5

Graf průběhu průměrných teplot ϑ_{av} :



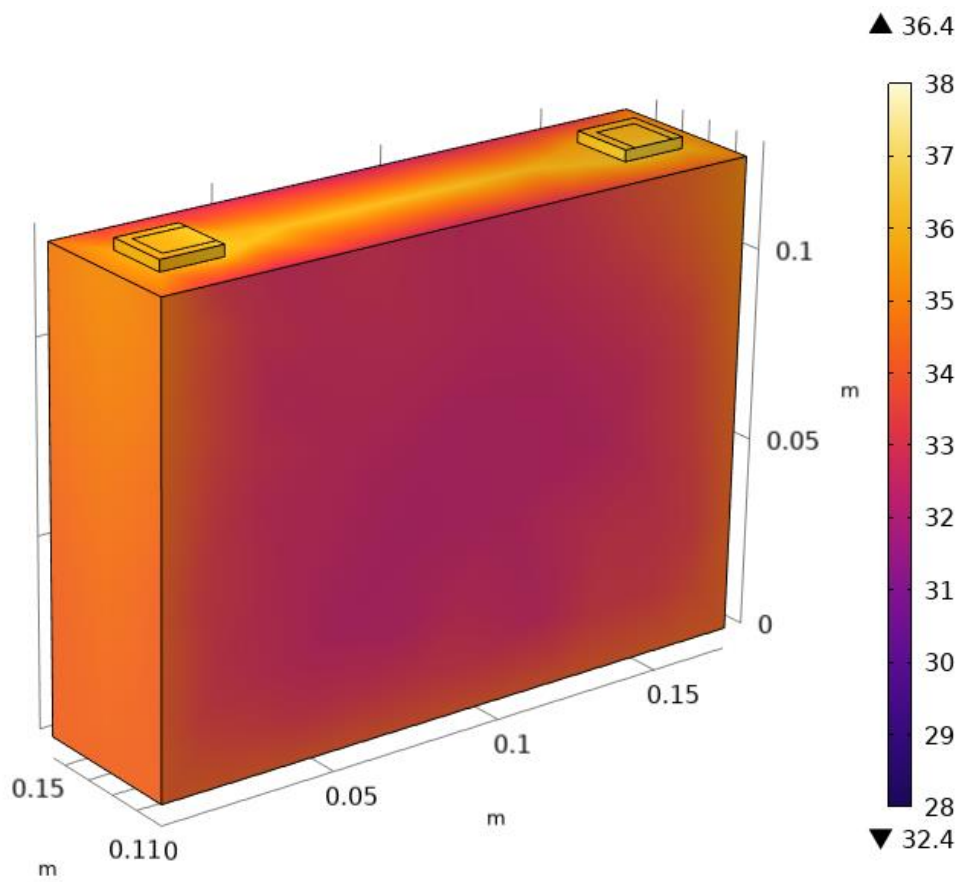
Graf 4.5

V případě takto odlišných způsobů chlazení je pozorovatelný rozdíl rozložení teploty bateriového článku v čase dokončení nabíjení (1600 s). Obrázek 4.1 ukazuje rozložení teploty článku v modulu s chladicím okruhem, obrázek 4.2 na další stránce ukazuje rozložení teplot modulu chlazeného pouze PCM ve stejném čase dokončení nabíjení. U obou obrázků je záměrně zvolena stejná teplotní škála. Na aktivně chlazeném akumulátoru byla vypočítána nižší minimální teplota (29,1 °C vůči 32,4 °C u pasivního chlazení), u pasivně chlazeného akumulátoru je zase pozorovatelná rovnoměrnější distribuce teplot ($\Delta\vartheta = 4\text{ °C}$ oproti rozdílu $\Delta\vartheta = 8,5\text{ °C}$ u aktivního chlazení). Ačkoli teplotní gradient není zanedbatelným faktorem pro kalkulaci výdrže článku [36], tak v této práci s ním nijak počítáno nebude, protože standardní Lumped Li-Ion battery modul v COMSOL tento parametr pro výpočet poklesu kapacity nezahrnuje.



Obrázek 4.1, teplota ϑ (°C) na povrchu článku chlazeného glykolovým okruhem

Je zřejmé, že bez aktivního chladicího okruhu není teplo z článku odebíráno ze spodní části, ale především ze stran, které jsou v kontaktu s PCM bloky, což lze vidět na obrázku 4.2 níže.



Obrázek 4.2, teplota ϑ (°C) na povrchu článku chlazeného PCM

4.4 Zhodnocení výsledků

Z výsledků je patrné, že použití materiálů s fázovým přechodem přispělo ve všech případech k celkovému snížení teplot. Ve srovnání pasivního chlazení vidíme snížení průměrné teploty článků na konci nabíjení o 6 °C při počáteční teplotě $\vartheta_0 = 20$ °C; při počáteční teplotě $\vartheta_0 = 26$ °C vyšel tento rozdíl nepatrně menší, konkrétně 5,5 °C.

Srovnání aktivních chlazení ukazuje, že aplikace PCM může ke snížení růstu teplot článků také přispět. Při $\vartheta_0 = 20$ °C činil rozdíl teplot na konci nabíjení 2,1 °C; naopak v případě vyšší počáteční teploty 26 °C byl zaznamenán vyšší rozdíl, a to 3,5 °C.

V případě porovnání s chladicím okruhem přináší chlazení pomocí PCM za stanovených podmínek srovnatelný chladicí výkon, porovnáme-li průměrné teploty akumulátorů během procesu nabíjení. Rozdíl teplot na konci nabíjení činí pouze 0,1 °C. Znatelně se odlišuje rozložení teplot, které avšak dále v práci nebudeme nijak započítávat.

Z průběhů teplot lze usuzovat, že nízký součinitel tepelné vodivosti parafínu není příliš omezujícím faktorem pro chladicí výkon, což lze nejlépe pozorovat na grafu 4.2. Děj ohřevu je dostatečně pomalý (nabíjení trvalo přibližně 27 minut) na to, aby mohlo být teplo absorbováno pro fázovou přeměnu použitého PCM. Po fázové přeměně následuje opět strmější růst teplot, protože je teplo absorbováno pouze tepelnou kapacitou kapalného parafínu. Kritérium rizika maximální teploty článků je obtížné stanovit, protože až do teploty exotermních reakcí nemá tepelná zátěž akumulátoru žádný okamžitě pozorovatelný účinek. K dosažení kritických teplot uvedených v kapitole 2.2.1 (v našem případě 168 °C) nedošlo ani v jednom případě, jelikož nárůst teplot nebyl zdaleka tak markantní, aby nastala jakákoli exotermní reakce či úplné zahoření článku.

KAPITOLA 5: SIMULACE POKLESU KAPACITY

V předchozí kapitole byly vypočítány průběhy teplot článků při jejich rychlém nabíjení. Pro vyhodnocení chladičho výkonu avšak samotný záznam teplot není postačující, protože žádná z konečných teplot v předchozí kapitole není pro akumulátor fatální. Z toho důvodu se pokusíme vyhodnotit chladič systém pomocí simulace poklesu kapacity v závislosti na teplotě během nabíjení a vybíjení článků.

Možným způsobem modelování poklesu kapacity je cyklování simulovaného bateriového modulu. Ve skutečnosti je pokles kapacity článků ovlivněn způsobem užívání bateriového systému, který zahrnuje provozní teploty, velikosti nabíjecích a vybíjecích proudů, četnost užívání nebo stav nabití při nečinnosti [17, 37]. Vzhledem k různosti uvedených provozních parametrů jsou predikce výdrže bateriových článků obtížné; jednodušší je přesně stanovit podmínky pro testování (ať už pomocí simulace nebo experimentálního měření) a v těchto podmínkách srovnávat články mezi sebou.

V této kapitole se pokusíme o odhad výdrže simulovaného lithiového akumulátoru v závislosti na jeho teplotě během cyklování. Budeme předpokládat, že:

1. Počáteční teplota se při nabíjení a vybíjení nemění. To znamená, že neuvažujeme změnu teploty okolí během cyklování.
2. Změna teplotního chování článků (vyšší ohřev v důsledku degradace) se neuvažuje.
3. Zanedbáváme nerovnoměrnou distribuci teplot jak v jednom článku, tak v rámci článků v modulu (článek na okraji modulu je chlazen stejně jako prostřední článek).
4. Konečná teplota po skončení jednoho cyklu není započítána jako teplota při nečinnosti mezi cykly. Teplotní „zátěž“ článku je uvažována pouze při dodávání nebo spotřebovávání elektrického výkonu.
5. Velikost a průběh nabíjecího a vybíjecího proudu se nemění. Uvažujeme, že bateriový systém je užíván stále stejným způsobem.
6. Aktivační energie chemických procesů a ohmická polarizace článků zůstávají stejné. Mění se pouze využitelný náboj článků.

Pro zkrácení výpočetního času je záhodno používat pouze fyziku objektu Battery pack; fyziku prostupu tepla, proudění kapaliny a tání PCM v našem případě ze simulace cyklování vynecháme a teplotu modelu zahrneme pouze jako časově proměnný vstupní parametr. Časově proměnnou funkci teploty získáme ze simulace jednoho cyklu, ve kterém využijeme celou fyziku modelu. Výsledky simulace jednoho cyklu využijeme pro vytvoření tabulky průměrných teplot článků $T = \{T_0, T_{10}, T_{20}, \dots, T_n\}$. Hodnoty budou proloženy lineární funkcí $T = f(t)$, která bude vstupním parametrem pro simulaci cyklování. Je zřejmé, že jsme tímto postupem zcela zanedbali význam teplotních gradientů a nerovnoměrné distribuce teploty na článcích. Vzhledem k COMSOL modulu Capacity fade je taková aproximace nepodstatná, protože se nejedná o simulaci chemických procesů, ale jen o odhad četnosti nežádoucích chemických reakcí pomocí Arrheniovy funkce, jejíž vstupním parametrem je průměrná teplota článku.

Dále je zapotřebí nastavit periodizaci funkce $T = f(t)$ tak, aby byla proměnlivá teplota správně zahrnuta v každém dalším cyklu, a nikoli jen v prvním. Nabízí se jednoduché řešení; neuvažovat teplotu jako funkci času, nýbrž jako funkci dvou proměnných, díky kterým je možné přesně určit děj, který by v závislosti na čase probíhal. Znamená to, že zavedeme teplotu například jako funkci proudu a stavu nabití, takže předpisem bude $T = f(I, \text{SoC})$. Předvedeme tak možnému problému,

že se kvůli zaokrouhlovacím chybám a proměnlivému času nabíjení (kvůli klesající kapacitě) periodická funkce teploty v čase postupně „rozejde“ se stavem článků, ke kterému ji chceme přiřadit. Nevýhodou je, že budeme muset zanedbat teplotu při nečinnosti akumulátorů (bude nastavena jako teplota okolí).

5.1 Proudová zátěž bateriového modulu

Proces nabíjení a vybíjení bateriového modulu je realizován pomocí objektu Charge-Discharge cycling. Zadávanými hodnotami jsou velikosti napětí při požadovaném koncovém a počátečním stavu nabití a velikost nabíjecího/vybíjecího proudu, přičemž v souladu s předpoklady zmíněnými v úvodu se tyto velikosti napětí a proudu nebudou měnit. Velikost nabíjecího proudu ponecháváme stejnou jako v první kapitole, tedy $I_{nab} = 131,6$ A. Velikost proudu, který článek bude vybíjet, můžeme stanovit z dat průměrné spotřeby a průměrné rychlosti při takové spotřebě, což je uvedeno v [35]. Změny napětí celého bateriového systému zanedbáme a budeme je považovat za konstantní. Odhad průměrné velikosti odebíraného proudu nechť je

$$I_{vyb} = \frac{\text{průměrná spotřeba na (Wh/100 km)}}{\frac{100 \text{ km}}{\text{průměrná rychlost (km/h)}} \cdot \text{jmenovité napětí bateriového systému (V)}}, \quad (15)$$

$$I_{vyb} = \frac{14\,300}{\frac{100}{60,4} \cdot 350} \text{ A} \cong 24,7 \text{ A}. \quad (16)$$

Zadávané hodnoty pro výpočet poklesu využitelné kapacity článku zůstávají stejné; z části 3.3.2 *Pokles kapacity baterie* si připomeňme, že šlo o efektivní aktivační energii $E_a = 32,2 \text{ kJ mol}^{-1}$, konstantu degradace proudovým zatížením $H \cong 4,35 \cdot 10^{-5}$ na cyklus a konstantu časové degradace $\tau = 85$ let.

5.2 Stanovení celkové doby ku jednomu cyklu

Aby mohly být výsledky této kapitoly použitelné pro ekonomické ohodnocení časově závislými ukazateli, bude zapotřebí určit počet cyklů za určitý čas. Závislost na době nečinnosti mezi cykly byla akcentována v [37], jelikož rychlé cyklování článku bez uvažování doby nečinnosti není vhodným prostředkem k předpovědi doby živostnosti článků, a to ani v případě experimentálního měření, ani v případě simulace.

Možný počet provedených cyklů za určitý čas určíme z hodnoty průměrného ročního nájezdu vozů s elektrickým pohonem, z průměrné spotřeby vybraného elektromobilu a z energie bateriového systému. Průměrný roční nájezd bateriových elektrických vozů (BEV) registrovaných a servisovaných v ČR byl za rok 2022 vypočítán na 12 386 km [38]. Průměrná spotřeba elektromobilu BMW i3 96 Ah dle ukazatele EVDB real range, ilustrující reálnou spotřebu při kombinovaném provozu město/dálnice při venkovní teplotě 23 °C, je 14,3 kWh/100 km [35]. Dále budeme předpokládat, že je aktivně využíváno 60 % z celkové využitelné energie bateriového systému (protože je článek nabíjen z 20 % využitelné kapacity na 80 %), tedy 13,62 kWh z celkových 22,7 kWh.

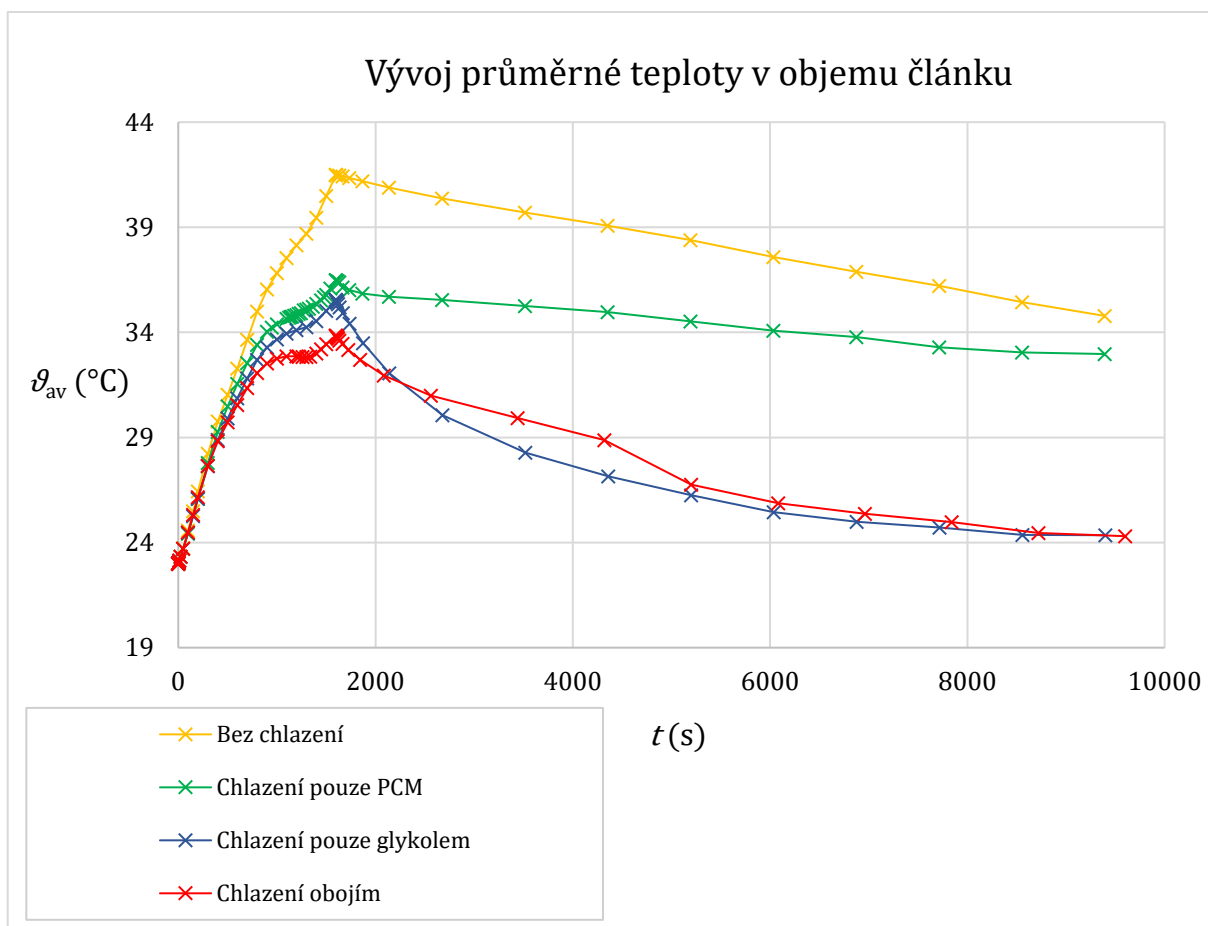
Protože potřebujeme zjednodušit proces cyklování na periodický děj, budeme předpokládat, že uvažovaný roční nájezd je konstantní. Za takového předpokladu můžeme počítat, že

$$\text{počet dobití za rok} = \frac{\text{roční nájezd (km)} \cdot \text{spotřeba(Wh/km)}}{\text{využívaná kapacita (Wh)}} = \frac{12\,385 \cdot 143}{13\,600} \cong 130, \quad (17)$$

což je přibližně 5 cyklů za 14 dní na počátku simulování. Počet cyklů za rok bude během cyklování postupně narůstat, protože klesající kapacita bude pro zachování rozsahu stavu nabití baterií (20 ÷ 80) % vyžadovat častější nabíjení.

5.3 Simulace teplot během jednoho cyklu

Počáteční teplota při nabíjecím cyklu je 23 °C (venkovní teplota při EVDB měření dojezdu), po nabití následuje minuta dlouhý úsek (rest period) bez proudové zátěže, následně je článek vybíjen vypočítaným proudem $I_{\text{vyb}} = 24,7$ A. Znamená to také, že proces nabíjení má teplotní dopad na následný proces vybíjení, což lze vidět na grafu 5.1.



Graf 5.1, průběh teplot článků s různým typem chlazení při jednom cyklu

Na průběhu teplot při vybíjení bateriového modulu (od 1600 s) si lze na kombinovaném chlazení (červeně) povšimnout pomalejšího poklesu průměrné teploty článků. Při tuhnutí parafínu se skupenské teplo uvolňuje zpět do okolí, takže chlazení celé soustavy probíhá pomaleji.

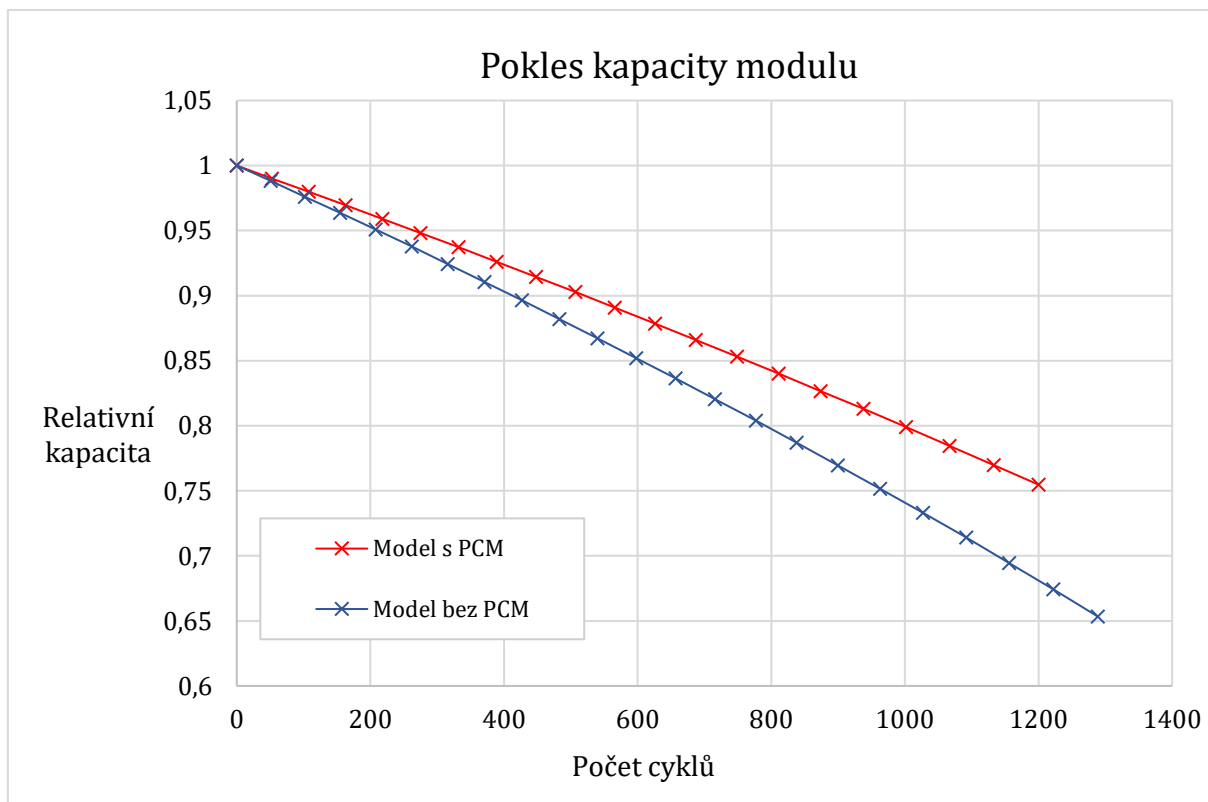
5.4 Srovnání pasivních chlazení

Srovnávanou hodnotou bude relativní kapacita po osmi letech užívání baterií, počet cyklů se kvůli odlišné kapacitě článků odlišuje (bateriový systém je při nižší kapacitě potřeba dobít častěji). Srovnávané hodnoty jsou barevně zvýrazněny v tabulce níže, která udává hodnotu relativní kapacity Q_r pro daný počet cyklů.

Model bez PCM		Model s PCM	
Počet cyklů	Relativní kapacita	Počet cyklů	Relativní kapacita
0	1,000	0	1,000
102	0,976	108	0,980
208	0,951	218	0,959
316	0,924	332	0,937
427	0,896	448	0,914
540	0,867	566	0,891
657	0,836	687	0,866
777	0,804	811	0,840
1027	0,733	938	0,813
1156	0,694	1067	0,785
1254	0,664	1188	0,757
1357	0,632	1200	0,755

Tabulka 5.1

Graf poklesu relativní kapacity vůči počtu cyklů:



Graf 5.2

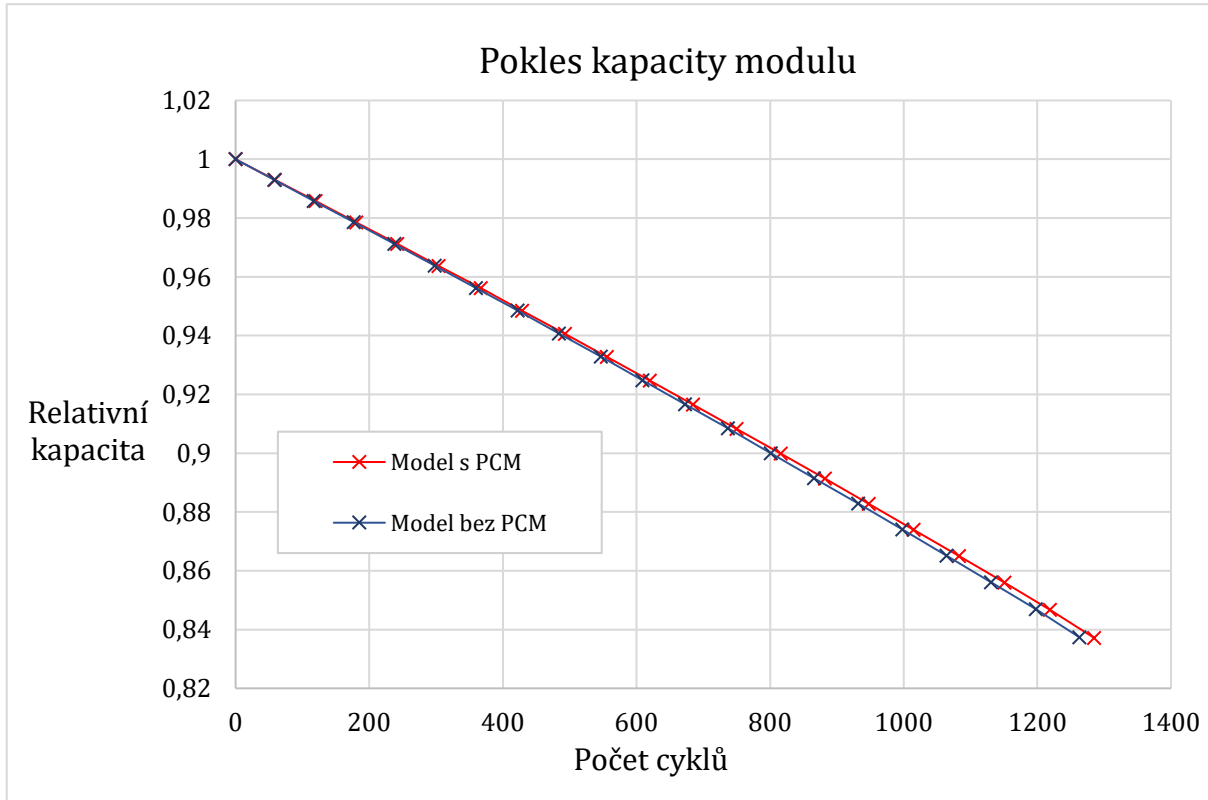
5.5 Srovnání aktivních chlazení

Tabulka hodnot relativní kapacity vůči počtu cyklů:

Model bez PCM		Model s PCM	
Počet cyklů	Relativní kapacita	Počet cyklů	Relativní kapacita
0	1,000	0	1,000
117	0,986	120	0,986
237	0,972	242	0,972
359	0,958	366	0,958
483	0,943	492	0,943
609	0,927	620	0,927
736	0,912	749	0,911
864	0,895	880	0,895
996	0,879	1014	0,878
1121	0,862	1120	0,865
1128	0,861	1149	0,861
1262	0,844	1284	0,843

Tabulka 5.2

Graf poklesu relativní kapacity vůči počtu cyklů:



Graf 5.3

5.6 Srovnání aktivního a pasivního chlazení

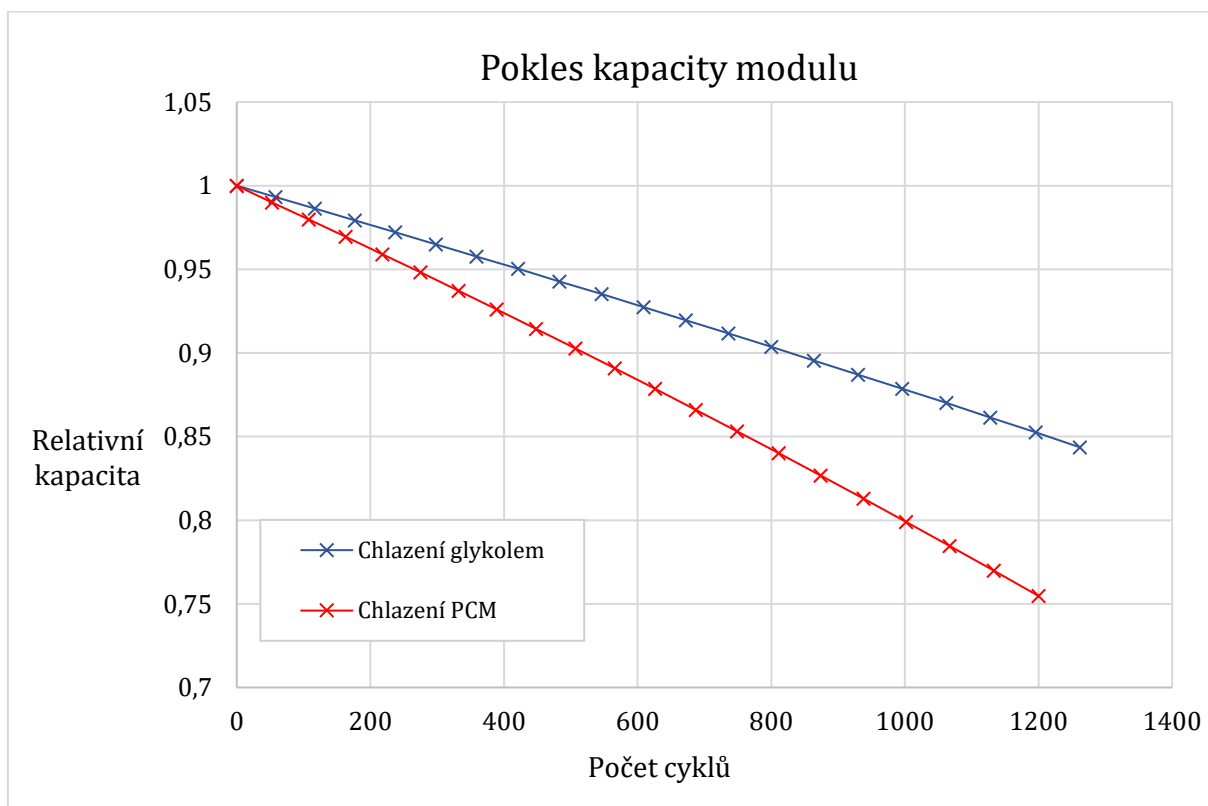
Obdobně jako v předchozí kapitole srovnáme ještě relativní pokles kapacity modulu s chladičím okruhem a modulu s PCM bloky.

Tabulka hodnot relativní kapacity vůči počtu cyklů:

Chladičím okruh		Pasivní s PCM	
Počet cyklů	Relativní kapacita	Počet cyklů	Relativní kapacita
0	1,000	0	1,000
117	0,986	108	0,980
237	0,972	218	0,959
359	0,958	332	0,937
483	0,943	448	0,914
609	0,927	566	0,891
736	0,912	687	0,866
864	0,895	811	0,840
996	0,879	938	0,813
1121	0,862	1067	0,785
1128	0,861	1188	0,757
1262	0,844	1200	0,755

Tabulka 5.3

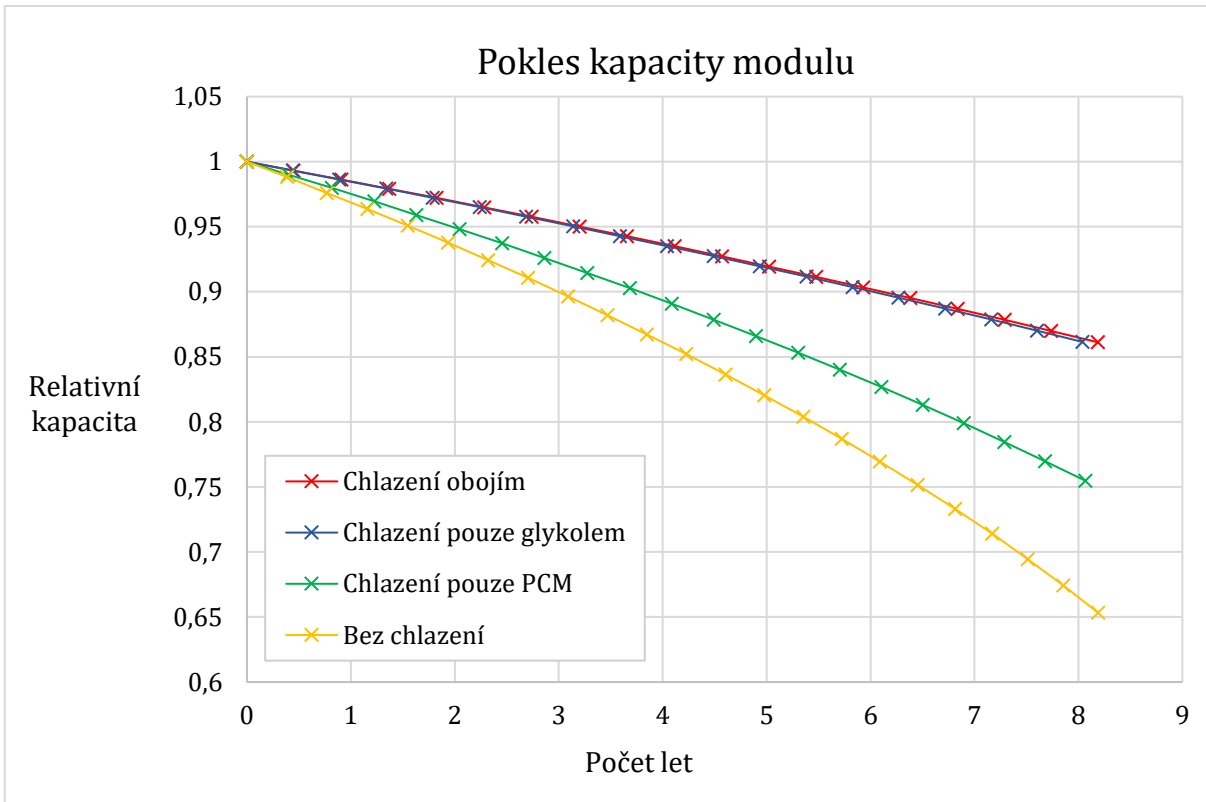
Graf poklesu relativní kapacity vůči počtu cyklů:



Graf 5.4

5.7 Zhodnocení výsledků

Pro všeobecné srovnání uvedme ještě graf se všemi průběhy poklesu kapacity:



Graf 5.5, pokles kapacity článků v modulu při různých typech chlazení

Jako v předchozí kapitole vidíme, že v případě přidání PCM do nechlazeného modulu dojde ke znatelnému zmírnění úbytku relativní kapacity článků. Po osmi letech cyklování činí rozdíl relativních kapacit $\Delta Q_r = 9,32 \%$.

V případě přidání bloků PCM do modulu s aktivním chlazením je rozdíl kapacit mnohem méně znatelný, $\Delta Q_r = 0,252 \%$. Tento údaj nepochybně rozporuje domněnku formulovanou v kapitole 2.4.1, protože kombinace aktivního chlazení s parafíny nepřináší žádaný efekt zvýšení životnosti.

Kvůli zahrnutí celého cyklu způsobem, že vybíjení probíhá pouze 60 s po nabíjení, dostáváme odlišné výsledky pro samotné glykolové a samotné PCM chlazení. Na grafu teplot 5.1 vidíme, že pokud modul není nijak aktivně chlazen, je teplo jen slabě odváděno prostupem tepla do okolí. Vypočítaný rozdíl relativních kapacit je v tomto případě $\Delta Q_r = 10,5 \%$.

KAPITOLA 6: OHODNOCENÍ VYUŽITELNOSTI PCM

V této kapitole se pokusíme posoudit přínos chlazení článků na základně jeho relativní využitelné kapacity po průběhu cyklování za podmínek, které byly určeny a popsány v předchozí kapitole. Předpokládáme, že bateriový modul nebude během užívání vystaven nižším než optimálním pracovním teplotám; vyžadovalo by to užití aktivního ohřevu článků namísto jejich chlazení, což již není součástí tématu této práce.

Zhodnocení využitelnosti chlazení bateriového systému budeme vztahovat k čisté současné hodnotě použitých lithiových akumulátorů, které uvažovaný bateriový systém obsahuje. Současnou hodnotu článku budeme jednoduše vyhodnocovat jako jeho počáteční cenu násobenou jeho zbytkovou relativní kapacitou. Srovnávat budeme relativní kapacity článků po osmi letech cyklování, což lze v souladu s průzkumem iSeeCars (uskutečněného v USA v letech 2014 až 2018) považovat za průměrnou dobu užívání nového automobilu [39].

Čistou současnou hodnotu (NPV) budeme počítat jako

$$\text{NPV} = \sum_{t=0}^T \text{CF}_t (1+r)^{-t}, \quad (18)$$

kde CF_t je peněžní tok během období t a r je odúročitel peněžních toků (diskont), zastupující faktor ceny ušlé příležitosti. Znaménko u hodnot peněžních toků budeme chápat tak, že příjmy mají znaménko kladné, výdaje záporné. Veškerá NPV budou proto vycházet záporná, jelikož v našem případě nákup chlazení do bateriových modulů není (ve striktně mikroekonomickém smyslu) investicí, protože v budoucnu nebude samo o sobě přinášet žádný zisk; může pouze prodloužit životnost baterií.

Velikost odúročitele r můžeme určit jako očekávanou výnosovou míru dle modelu CAPM, který tuto míru vyjadřuje v podobě

$$r = r_f + \beta(r_m - r_f). \quad (19)$$

Základem výnosové míry je bezrizikový výnos r_f , který v našem případě bude stanoven jako výnos německého státního dluhopisu s dobou vyplacení za 8 let (2,42 % [40]), r_m je očekávaná výnosová míra trhu (7,13 % [41]) a β je koeficient rizikovosti trhu (1,21 [41]), přičemž r_m a β vztahujeme k trhu automobilových součástek. Velikost diskontu tedy bude

$$r = 0,0242 + 1,21(0,0713 - 0,0242) = 0,081191. \quad (20)$$

Všechny dále uvedené ceny budou uvažovány s DPH, ceny původně v dolarech byly přepočítány dle [42], stejně tak ceny v eurech nebo librách¹.

6.1 Cena PCM

Výchozí uvažovanou cenou parafínu bude cena technického eikosanu, což je o jeden uhlovodík vyšší alkan než v předchozích kapitolách jmenovaný nonadekan, která je 193,4 Kč/kg [43]. Protože uvažujeme umístění parafínu do bateriového systému o 96 bateriích seskládaných do osmi bateriových modulů po dvou šestiřadách, tak budeme dohromady potřebovat ca 13,52 kg tuhého PCM, pokud budeme chtít 1 cm tlustý blok umístit mezi každé články v bateriovém modulu

¹ Přepočet byl proveden dle kurzu platného v den citace reference, tedy dne 13. 12. 2023.

(takže celkově jich bude 80). Celková cena PCM v bateriovém modulu pro technický eikosan tak bude činit 2 615,8 Kč.

6.2 Cena baterií

Z důvodu neznámých cen konkrétního bateriového systému, který články SAMSUNG SDI 94 Ah (s cenou 1785,2 Kč [44]) využívá, tak budeme pro srovnávání počítat s cenou celkově 96 bateriových článků, které obsahuje elektromobil BMW i3 94 Ah. Výsledná cena všech lithiových akumulátorů je $P_0 = 171\,379$ Kč.

Ohodnocení bateriových článků budeme považovat za přímo úměrné kapacitě článků. V tomto kroku budeme předpokládat, že výsledná relativní kapacita bateriového modulu odráží relativní kapacitu všech článků (články degradují rovnoměrně). Cenu článků po době cyklování T pak vyjádříme jako $P_T = Q_r \cdot P_0$.

6.3 Využití PCM v pasivním chlazení

Obdobně jako v předchozích sekcích se budeme zabývat tím, jaký efekt má přidání bloků parafínu do bateriového modulu.

Nejprve vypočítáme NPV v osmém roce pro výchozí hodnoty uvedené výše, což bude pro oba bateriové moduly výpočet

$$\text{NPV} = \text{CF}_0 + \text{CF}_8 \cdot (1 + r)^{-8}, \quad (21)$$

V případě modulu bez parafínu budeme počítat s toky, jejichž hodnota bude

$$\text{CF}_0 = - \text{cena baterií} = -171\,379 \text{ Kč} \quad (22)$$

$$\text{CF}_8 = +(Q_r \cdot \text{cena baterií}) \cdot (1 + r)^{-8}, \quad (23)$$

$$\text{CF}_8 = (0,664\,187 \cdot 171\,379) \cdot (1 + 0,081\,191)^{-8} \text{ Kč} = 60\,958 \text{ Kč}, \quad (24)$$

takže výsledná hodnota NPV ničím nechlazeného modulu je

$$\text{NPV}_{\text{bez PCM}} = (-171\,379 + 60\,958) \text{ Kč} = -110\,421 \text{ Kč}. \quad (25)$$

Obdobně vypočítáme i hodnotu NPV_{PCM} jako

$$\text{NPV}_{\text{PCM}} = (- \text{cena baterií} - \text{cena PCM}) + (Q_r \cdot \text{cena baterií}) \cdot (1 + r)^{-8}, \quad (26)$$

$$\text{NPV}_{\text{PCM}} = (-171\,379 - 2615,8) \text{ Kč} + (0,757\,420 \cdot 171\,379) \cdot (1 + 0,081\,191)^{-8} \text{ Kč}, \quad (27)$$

$$\text{NPV}_{\text{PCM}} = -104\,480 \text{ Kč}, \quad (28)$$

Pro názornější číselnou interpretaci budeme výhodnost aplikace PCM porovnávat jako rozdíl hodnot $\text{NPV}_{\text{PCM}} - \text{NPV}_{\text{bez PCM}}$.

Pro výchozí cenu PCM (technický eikosan) bude tato hodnota rovna

$$NPV_R = -104\,480 \text{ Kč} - (-110\,421) \text{ Kč} = 5\,941 \text{ Kč.} \quad (29)$$

Z čehož vyplývá, že je výhodnější aplikovat PCM pro pasivně chlazený bateriový modul (provozovaný podmínkách, v jakých byla simulace provedena), než ponechávat akumulátory bez chlazení.

Protože zatím není známo, že by jakékoli organické parafíny byly použity pro chlazení baterií v elektromobilu, tak nedovedeme přesně určit, jaká kvalita PCM bude pro tuto aplikaci potřeba. Z toho důvodu sestrojíme tabulku rozdílových NPV_R pro různé ceny parafínů, přičemž dolní mezí bude nejlevnější směs eikosanu (54,9 Kč/kg [43]) a horní mezí bude čistá laboratorní směs tohoto alkanu (1480,3 Kč/kg [43]).

Tabulka rozdílů NPV_R (Kč):

Cena PCM (Kč/kg)	Diskont				
	6 %	7 %	8,12 %	9 %	10 %
(-)					
54,9	9 282	8 556	7 814	7 276	6 711
100,0	8 672	7 947	7 204	6 666	6 101
193,4	7 409	6 684	5 941	5 403	4 838
300,0	5 966	5 241	4 498	3 960	3 395
500,0	3 261	2 535	1 792	1 255	690
800,0	-798	-1 524	-2 266	-2 804	-3 369
1000,0	-3 504	-4 229	-4 972	-5 510	-6 075
1200,0	-6 210	-6 935	-7 678	-8 215	-8 780
1480,3	-10 002	-10 728	-11 470	-12 008	-12 573

Tabulka 6.1, hodnoty NPV_R v závislosti na diskontu a ceně PCM

Kladné hodnoty NPV_R v tomto případě neznamenají příjem, ale znamenají výhodnost aplikace PCM při jeho ceně a použitém diskontu oproti ponechání modulu bez chlazení. Vidíme, že laboratorně čistý parafín je již pro aplikaci nevýhodný, zatímco technický eikosan je výhodný i při vyšší míře odúročitele.

6.4 Využití PCM v aktivním chlazení

Protože pro ohodnocení aplikace PCM využíváme rozdílové NPV, tak v této kapitole prozatím nebudeme počítat s finančními toky spojenými s aktivním chlazením, protože se při rozdílu $NPV_{PCM} - NPV_{bez\ PCM}$ tyto hodnoty odečtou bez vlivu na výsledek NPV_R . Výpočet této hodnoty bude

$$NPV_R = [CF_0 + CF_8]_{PCM} - [CF_0 + CF_8]_{bez\ PCM} = [CF_8 - \text{cena PCM}]_{PCM} - [CF_8]_{bez\ PCM}, \quad (30)$$

$$NPV_R = \left(\frac{148\,218}{(1 + 0,081\,191)^8} - 2616 \right) \text{Kč} - \frac{147\,786}{(1 + 0,081\,191)^8} \text{Kč} = -2\,385 \text{Kč}. \quad (31)$$

Hodnota rozdílového NPV_R pro výchozí hodnoty diskontu a cen PCM vychází záporná, což pro nás znamená, že se v námi stanovených podmínkách nevyplatí užívat materiály s fázovým přechodem souběžně s aktivním chlazením akumulátorů.

Tabulku s hodnotami NPV_R v závislosti na diskontu a cen PCM nemá význam uvádět vzhledem k faktu, že NPV_R při nulovém diskontu ($r = 0$) a užití nejlevnější parafínové směsi (54,9 Kč/kg) vychází v hodnotě

$$NPV_R = \left(\frac{148\,218}{1} - 743 \right) \text{Kč} - \frac{147\,786}{1} \text{Kč} = -311 \text{Kč}, \quad (32)$$

z čehož lze jednoznačně usoudit, že žádné NPV_R v tabulce by nevycházelo příznivě pro aplikaci PCM do modulu s aktivním chlazením.

6.5 Porovnání aktivního a pasivního chlazení

Stejně jako v předchozích kapitolách se zaměříme i na porovnání pasivního chlazení s PCM vůči aktivnímu chlazení s glykolovým okruhem, protože bude nezbytné nejprve vyčíslit cenu komponent aktivního chlazení. Jako příklad může posloužit model popsany v kapitole 2.3.1, tedy systém využívající dva okruhy s chladicí tekutinou. Jednotlivé součásti dvouokruhového chlazení jsou vypsány níže v tabulce 6.2.

Komponenty	Cena (Kč)	Reference
Okruh s nemrznoucí směsí		
1. Rezervoár pro chladicí směs	823,9	[45]
2. Čerpadlo	1 510,6	[46]
3. Dutý plech protékající glykolem	32 078,6	[47]
4. Potrubí spojující komponenty	769,0	[48]
5. Glykol (7 l)	1 894,3	[49]
Okruh s fázovou přeměnou		
6. Kompresor	4 943,6	[50]
7. Výparník s expanzním ventilem	3 570,4	[51]
8. Kondenzátor s ventilátorem	3 168,6	[48]
9. Nízkotlaké potrubí	2 746,5	[52]
10. Vysokotlaké potrubí	3 570,4	[53]
11. Chladivo R134a (1 l)	816,8	[54]
Celkem	55 892,6	

Tabulka 6.2, sestava aktivního chlazení

Nejdražší položkou v seznamu je bezpochyby hliníková konstrukce umožňující chlazení nemrznoucí směsí. Položka byla vybrána dle rozměrů jednoho plechu, který je potřebný k uchazení jednoho bateriového modulu o přibližné délce 360 mm a šířce 275 mm. Celkový rozměr samotných baterií poskládaných do konstrukce bateriového systému sestávajícího z osmi bateriových modulů činí 2,2 m na délku a 1,4 m na šířku, přičemž neuvažujeme rozměr stěn modulů a ostatních elektronických komponent. Celkový rozměr všech osmi chladicích bloků poskládaných pod bateriovými moduly je (2,4 na 1,5) m.

Je zřejmé, že aktivní chlazení nutně zahrnuje i provozní náklady. Přesný vypočet spotřebované energie v našem modelu není možný, protože neznáme okamžitou hodnotu příkonu elektrických součástek (čerpadlo a kompresorová jednotka) při uvažovaném cyklování. Můžeme se ale pokusit na základě hodnot maximálního příkonu glykolového čerpadla ($P_{\max} = 91 \text{ W}$ [55]) a kompresorové jednotky ($P_{\max} = 4,5 \text{ kW}$ [56]) a na základě příkonů uvedených v referencích [57, 58] o odhad spotřeby aktivního chlazení; řekněme tedy, že za simulovaných podmínek spotřebovává aktivní chlazení příkon 1 kW. Dále budeme uvažovat, že tento příkon je při celém cyklu konstantní po dobu jednoho cyklu (trvajících na začátku simulace ca 2 hodiny 37 minut). Spotřebovanou energii za rok budeme považovat za konstantní, protože mění se kapacita baterie je „kompenzována“ narůstajícím počtem cyklů.

Výchozí cena za 1 kW elektrické energie necht' je pro náš případ stanovena podle ceníku sítě dobíjecích stanic PREpoint, ve kterém je za nabíjení stejnosměrným proudem (uvažované v předchozích kapitolách jako jediný způsob nabíjení bateriového systému) účtováno 12 Kč/kWh. Na počítaném období budeme předpokládat, že se tato hodnota měnit nebude. Myšlené náklady na provoz aktivního chlazení za jeden rok můžeme spočítat vynásobením doby jednoho cyklu (h) příkonem chlazení (kW), cenou elektrické energie (Kč/kWh) a počtem dobití za rok. Číselně bude výpočet

$$CF_{1-8} = 2,6097 \text{ h} \cdot 1 \text{ kW} \cdot 12 \text{ Kč/kWh} \cdot 130,224 = 4\,078,3 \text{ Kč.} \quad (33)$$

Pomocí výše uvedených hodnot můžeme spočítat čistou současnou hodnotu pro aktivní chlazení,

$$NPV_{\text{aktivní}} = \sum_{t=0}^8 CF_t (1+r)^{-t}. \quad (34)$$

Pro tento případ bude výpočet přehlednější pomocí tabulky jednotlivých toků:

Roky	CF chlazení (Kč)	CF baterie (Kč)	Net CF (Kč)
0	-55 892,6	-171 379,0	-227 271,6
1	-4 078,3		-3 772,0
2	-4 078,3		-3 488,8
3	-4 078,3		-3 226,8
4	-4 078,3		-2 984,5
5	-4 078,3		-2 760,4
6	-4 078,3		-2 553,1
7	-4 078,3		-2 361,4
8	-4 078,3	147 786,1	76 959,3

Tabulka 6.3, peněžní toky pro NPV

Takže suma všech toků jest

$$NPV_{\text{aktivní}} = \sum_{t=0}^8 CF_t (1 + 0,081191)^{-t} = -171\,459 \text{ Kč.} \quad (35)$$

Rozdílové NPV_R budeme pochopitelně počítat s dříve vypočítanou čistou současnou hodnotou baterií užitých s pasivním PCM, tedy s $NPV_{\text{PCM}} = -104\,480 \text{ Kč}$, spočítané pro výchozí diskont $r = 0,0812$ a cenu PCM $193,4 \text{ Kč/kg}$.

Výsledek rozdílového NPV je pro výchozí hodnoty $NPV_R = 66\,979 \text{ Kč}$.

Je evidentní, že se jedná o značně vysokou hodnotu ve prospěch užití pasivního PCM na úkor aktivního chlazení. Podobně jako v předchozí podkapitole by sestavení tabulky hodnot NPV_R nemělo smysl, protože ani v rámci zohlednění různých cen PCM, velikostí diskontu i cen aktivního chlazení by srovnávací tabulka nenabízela relevantní data. Aby se aktivní chlazení mohlo přesně rovnat alespoň nejdražšímu eikosanu o laboratorní kvalitě (tedy že $NPV_R = 0$), musela by jeho pořizovací cena být $6\,325 \text{ Kč}$ při zachování uvažované spotřeby.

Vychází tedy, že pro bateriový systém provozovaný za podmínek simulace pro cyklování by bylo výhodnější použít pasivní chlazení s parafínem namísto námi uvažovaného aktivního chlazení.

6.6 Zhodnocení výsledků

Pro interpretaci vypočítaných hodnot rozdílu čisté současné hodnoty NPV_R je důležité zdůraznit, že jediným prvkem pro porovnání efektivity chlazení byla data získaná z předchozí kapitoly (Simulace poklesu kapacity). Vstupní parametry cyklování (teploty, nabíjecí proud atd.) byly zvoleny tak, aby odpovídaly optimálním podmínkám provozu pro využití PCM. V souladu se zaměřením této práce jsme vůbec neuvažovali:

1. Problematiku nízkých teplot baterií, která je mimo rozsah této práce. Systém sloužící pro ohřev lithiových akumulátorů pomocí vnější energie nebyl uvažován, protože použití PCM není k tomuto účelu vhodné.
2. Provoz článků při vnějších teplotách výrazně převyšujících optimální teplotní rozsah ($20 \div 25$) °C, např. 35 °C. Při této vnější teplotě nelze články žádným způsobem zchladit pomocí pasivního chlazení do optimálního teplotního rozsahu.

Teplotní rozsah během cyklování navíc ve všech případech zahrnoval teplotní interval tání PCM, takže uvažované situace odpovídaly příznivým podmínkám pro využití parafínů jako chladicího materiálu k absorpci uvolňovaného tepla z baterií. Výsledky jsou tak platné pouze v rámci předpokládaných provozních podmínek, stejně jako v předchozích kapitolách.

V případě porovnání pasivních chlazení s PCM a bez něj lze na základě tabulky 6.1 dovést, že pro náš uvažovaný model je v rozsahu diskontu $r = (6 \div 10) \%$ výhodnější aplikovat parafín s cenou od 54,9 Kč/kg do ca 500 Kč/kg než ponechávat modul bez chladicích prvků (ve kterém je teplo odváděno pouze přirozeným prostupem tepla).

Z porovnání aktivních chlazení je naopak patrné, že instalace PCM do bateriového systému, který již obsahuje chladicí okruh, nepřináší téměř žádné výhody. V souladu s výše zmíněnými optimálními podmínkami pro PCM lze na základě počítaného NPV_R (a to i při nulovém odúročiteli) tvrdit, že použití parafínů v kombinaci s chladicím okruhem není výhodné.

Uvažování optimálních podmínek pro PCM pochopitelně ovlivňuje výsledky porovnání aktivního chlazení a pasivního chlazení za pomoci materiálů s fázovým přechodem. Pro lithiové akumulátory provozované za námi stanovených podmínek vychází použití samotného PCM výrazně výhodněji oproti systému s myšleným (dvojitým) chladicím okruhem.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo posouzení užitečnosti materiálů s fázovým přechodem (PCM) pro chlazení lithiových akumulátorů v elektromobilu. Testování použitelnosti těchto materiálů bylo provedeno pomocí simulace metodou konečných prvků v prostředí COMSOL. Pro srovnání různých způsobů chlazení byl nejprve simulován proces nabíjení, v následující kapitole byl simulován proces cyklického nabíjení a vybíjení článků a v poslední kapitole byla počítána výhodnost aplikace PCM do bateriového systému na základě zbytkové kapacity lithiových akumulátorů.

V prvním i druhém setu simulací byl testován lithiový (NMC) článek SAMSUNG SDI o náboji 94 Ah, přičemž simulovaný modul obsahoval pět těchto článků zapojených do série. V rámci tohoto bateriového modulu byly testovány čtyři různé způsoby chlazení, konkrétně: 1. pasivní chlazení využívající pouze prosup tepla do okolí; 2. pasivní chlazení obohacené o bloky PCM mezi články; 3. aktivní chlazení využívající chladicí okruh umístěný pod akumulátory a 4. aktivní chlazení obsahující navíc bloky PCM. Uvažovaným materiálem s fázovým přechodem byl parafín (nonadekan) s teplotou tání 32 °C.

Ve čtvrté kapitole byly zachyceny průběhy teplot při simulaci nabíjení (DC nabíjení o proudu 1,4C) bateriového modulu chlazeného výše uvedenými čtyřmi způsoby, a to při počátečních teplotách (které jsou uvažovány jako teplota okolního prostředí) 20 °C a 26 °C. Výsledkem této části je poznatek, že PCM je schopno snížit průměrné teploty článků jak v pasivním chlazení (rozdíl průměrných teplot činil 6 °C při teplotě okolí 20 °C), tak v aktivním chlazení (3,5 °C při okolní teplotě 26 °C). Dalším výsledkem je přibližně stejný chladicí výkon pasivního chlazení s PCM a aktivního chlazení bez PCM při okolní teplotě 20 °C.

Pátá kapitola byla zaměřena na vyhodnocení přínosu nižších teplot článků a zabývali jsme se v ní rychlostí poklesu využitelné kapacity lithiového akumulátoru v závislosti na jeho provozní teplotě. Velikost kapacity byla srovnávána po osmi letech cyklování za konstantních podmínek. Výsledkem je očekávatelný přínos PCM pro pasivní chlazení, velikost rozdílu byla $\Delta Q_r = 9,3 \%$. Naopak přínos PCM v aktivním chlazení se ukázal být velmi nízký, protože velikost ΔQ_r vyšla pouze 0,25 %. Výsledek porovnání pasivního chlazení s PCM a aktivního chlazení bez PCM se také odlišuje od očekávání ze čtvrté kapitoly, protože dosahuje hodnoty $\Delta Q_r = 10,5 \%$. Tento rozdíl lze vysvětlit tím, že během vybíjení článku není při pasivním chlazení s PCM článek nijak chlazen, spíše naopak; parafín postupně uvolňuje latentní teplo zpět do okolí a tuhne, takže celý bateriový modul vychládá pomaleji.

V poslední, šesté kapitole jsme ohodnotili přínos chlazení s PCM na základě vyčíslení ceny za použité lithiové akumulátory se zbývající využitelnou kapacitou po osmi letech cyklování. Pro pasivní chlazení vyšla koupě PCM do bateriového modulu příznivě, protože s uvažovaným diskontem $r \cong 8,12 \%$ a cenou parafínu 193,4 Kč/kg vychází rozdíl $NPV_R = 5\,941$ Kč. Nákup PCM do pasivně chlazeného bateriového systému provozovaného za simulovaných teplot se pro náš uvažovaný model vyplatí.

Přínos PCM pro aktivní chlazení, na rozdíl od předchozího případu, není pro náš model prakticky zaznamenanatelný; aplikace materiálů s fázovým přechodem do systému, který již obsahuje aktivní chlazení, vychází jako jednoznačně nevýhodná.

Srovnání použití PCM oproti uvažovanému chladicímu okruhu vychází jednoznačně ve prospěch PCM kvůli jeho nízké pořizovací ceně (oproti pořizovací ceně aktivního chladicího systému). Připomeňme si, že náš model byl uvažován pouze při konstantní teplotě okolí (23 °C), takže jiné benefity chladicího okruhu (potenciální možnost rozšíření o zahřívací jednotku, chlazení při vysokých teplotách) nebyly v našem srovnání uvažovány.

V souladu s cílem této práce můžeme nejjednodušeji posoudit přínos PCM pro aktivní chlazení. Protože se použití materiálů s fázovým přechodem ukázalo být nevýhodné v podmínkách, které utvářejí nevhodnější myslitelnou situaci pro jejich použití, tak lze obecně tvrdit, že pro aktivní chlazení nemá instalace PCM praktický přínos.

Přínos materiálů s fázovým přechodem jako alternativou k aktivnímu chlazení nebo k čistě pasivnímu chlazení je silně závislý na podmínkách, v jakých by myšlený bateriový modul byl provozován. Přínos vypočítaný v této práci proto platí především pro náš případ, v jakém provoz bateriového systému uvažujeme (konstantní teplota 23 °C, neměnnost velikosti nabíjecího proudu a dalších podmínek uvedených v páté kapitole). Možností pokračování této práce by proto mohlo být prozkoumání použití PCM za odlišných provozních podmínek.

REFERENCE A POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MAHMUD, Saifullah, Mostafizur RAHMAN, Md KAMRUZZAMAN, Md Osman ALI, Md Shariful Alam EMON, Hazera KHATUN a Md Ramjan ALI. Recent advances in lithium-ion battery materials for improved electrochemical performance: A review. *Results in Engineering* [online]. 2022, 15. ISSN 25901230. Dostupné z: doi:10.1016/j.rineng.2022.100472
- [2] SPIRIT ENERGY. Understanding Batteries. *44 Portman Road, Reading, RG30 1EA* [online]. 2022 [vid. 2022-12-26]. Dostupné z: <https://www.spiritenergy.co.uk/kb-batteries-understanding-batteries>
- [3] BATTERY UNIVERSITY. *BU-303: Confusion with Voltages* [online]. 25. říjen 2021 [vid. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-303-confusion-with-voltages>
- [4] PAVLOVEC, Lukáš a Jan ŽITKA. *Chemický pohled na lithium-iontové baterie*. 2018.
- [5] HOGREFE, Christin, Thomas WALDMANN, Miguel Benavente MOLINERO, Ludwig WILDNER, Peter AXMANN a Margret WOHLFAHRT-MEHRENS. Cross-Sectional In Situ Optical Microscopy with Simultaneous Electrochemical Measurements for Lithium-Ion Full Cells. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2022, 169(5), 050519. ISSN 0013-4651. Dostupné z: doi:10.1149/1945-7111/ac6c57
- [6] Battery and Energy Technologies. *Woodbank Communications Ltd* [online]. [vid. 2023-01-06]. Dostupné z: https://www.mpoweruk.com/cell_construction.htm
- [7] TECHNOLOGY LICENSE AGREEMENT [online]. [vid. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.lawinsider.com/contracts/grmWAl0b5Wn>
- [8] PROF. JOHN D. KELLY. *2021 Mustang Mach-E GT - Extended Range Battery Removal* [online]. B.m.: WeberAuto. 29. červenec 2022 [vid. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=6SX0K5MvCHQ>
- [9] PROF. JOHN D. KELLY. *There is no such thing as a Level 3 EV charger* [online]. 11. listopad 2019 [vid. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=jZBsOud409Q>
- [10] WILKINSON LUKE. The longest-range EVs on sale in 2023 [online]. 2022 [vid. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://www.carmagazine.co.uk/electric/longest-range-electric-cars-ev/>
- [11] LUO, Jie, Deqiu ZOU, Yinshuang WANG, Shuo WANG a Li HUANG. *Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): A comprehensive review* [online]. B.m.: Elsevier B.V. 15. únor 2022. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2021.132741
- [12] PRADA, E., D. DI DOMENICO, Y. CREFF, J. BERNARD, V. SAUVANT-MOYNOT a F. HUET. A Simplified Electrochemical and Thermal Aging Model of LiFePO₄-Graphite Li-ion Batteries: Power and Capacity Fade Simulations. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2013, 160(4), A616–A628. ISSN 0013-4651. Dostupné z: doi:10.1149/2.053304jes
- [13] HAN, Xuebing, Languang LU, Yuejiu ZHENG, Xuning FENG, Zhe LI, Jianqiu LI a Minggao OUYANG. *A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle* [online]. B.m.: Elsevier B.V. 1. srpen 2019. ISSN 25901168. Dostupné z: doi:10.1016/j.etrans.2019.100005

- [14] WANG, Qingsong, Ping PING, Xuejuan ZHAO, Guanquan CHU, Jinhua SUN a Chunhua CHEN. *Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery* [online]. B.m.: Elsevier B.V. 15. červen 2012. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2012.02.038
- [15] GOLUBKOV, Andrey W., David FUCHS, Julian WAGNER, Helmar WILTSCHE, Christoph STANGL, Gisela FAULER, Gernot VOITIC, Alexander THALER a Viktor HACKER. Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. *RSC Advances* [online]. 2014, 4(7), 3633–3642. ISSN 20462069. Dostupné z: doi:10.1039/c3ra45748f
- [16] GAO, Fei, Maosong FAN, Congjie WANG, Wei LIU a Yanli ZHU. Study on temperature change of LiFePO₄/C battery thermal runaway under overcharge condition. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [online]. B.m.: IOP Publishing Ltd, 2021. ISSN 17551315. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/631/1/012114
- [17] EDGE, Jacqueline S., Simon O’KANE, Ryan PROSSER, Niall D. KIRKALDY, Anisha N. PATEL, Alastair HALES, Abir GHOSH, Weilong AI, Jingyi CHEN, Jiang YANG, Shen LI, Mei Chin PANG, Laura BRAVO DIAZ, Anna TOMASZEWSKA, M. Waseem MARZOOK, Karthik N. RADHAKRISHNAN, Huizhi WANG, Yatish PATEL, Billy WU a Gregory J. OFFER. *Lithium ion battery degradation: what you need to know* [online]. B.m.: Royal Society of Chemistry. 14. duben 2021. ISSN 14639076. Dostupné z: doi:10.1039/d1cp00359c
- [18] KIM, Jaewan, Jinwoo OH a Hoseong LEE. *Review on battery thermal management system for electric vehicles* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 25. únor 2019. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020
- [19] *Battery Pack Database - Battery Design* [online]. [vid. 2023-11-21]. Dostupné z: <https://www.batterydesign.net/downloads/battery-pack-database/>
- [20] OLABI, A. G., Hussein M. MAGHRABIE, Ohood Hameed Kadhim ADHARI, Enas Taha SAYED, Bashria A.A. YOUSEF, Tareq SALAMEH, Mohammed KAMIL a Mohammad Ali ABDELKAREEM. Battery thermal management systems: Recent progress and challenges. *International Journal of Thermofluids* [online]. 2022, 15. ISSN 26662027. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijft.2022.100171
- [21] LEBROUHI, B. E., B. LAMRANI, M. OUASSAID, M. ABD-LEFDIL, M. MAAROUFI a T. KOUSKSOU. Low-cost numerical lumped modelling of lithium-ion battery pack with phase change material and liquid cooling thermal management system. *Journal of Energy Storage* [online]. 2022, 54. ISSN 2352152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2022.105293
- [22] LIMA, Pedro. *Comparison of different EV batteries in 2020* [online]. 26. březen 2022 [vid. 2022-12-25]. Dostupné z: Comparison of different EV batteries in 2020
- [23] Samsung SDI 94 Ah battery cell full specifications. *Pedro Lima* [online]. 20. březen 2022 [vid. 2022-12-25]. Dostupné z: <https://pushevs.com/2018/04/05/samsung-sdi-94-ah-battery-cell-full-specifications/>
- [24] *The Battery Design Module User’s Guide* [online]. 2020. Dostupné z: www.comsol.com/blogs
- [25] BROSA PLANELLA, Ferran, W DHAMMIKA WIDANAGE a Emma KENDRICK. *Thermal-electrochemical parameters of a high energy lithium-ion cylindrical battery*. nedatováno.
- [26] ZEMPACHI OGUMI. *Interfacial Reactions of Lithium-ion*. 2010.

- [27] MA, Shuai, Modi JIANG, Peng TAO, Chengyi SONG, Jianbo WU, Jun WANG, Tao DENG a Wen SHANG. *Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review* [online]. B.m.: Elsevier B.V. 1. prosinec 2018. ISSN 17455391. Dostupné z: doi:10.1016/j.pnsc.2018.11.002
- [28] YANN LIAW, Bor, E PETER ROTH, Rudolph G JUNGST, Ganesan NAGASUBRAMANIAN, Herbert L CASE a Daniel H DOUGHTY. *Correlation of Arrhenius Behaviors in Power and Capacity Fades with Cell Impedance and Heat Generation in Cylindrical Lithium-Ion Cells*. nedatováno.
- [29] WAZEER, Adil, Apurba DAS, Chamil ABEYKOON, Arijit SINHA a Amit KARMAKAR. Phase change materials for battery thermal management of electric and hybrid vehicles: A review. *Energy Nexus* [online]. 2022, 7, 100131. ISSN 27724271. Dostupné z: doi:10.1016/j.nexus.2022.100131
- [30] VÉLEZ, Catalina, José M. ORTIZ DE ZÁRATE a Mohamed KHAYET. Thermal properties of n-pentadecane, n-heptadecane and n-nonadecane in the solid/liquid phase change region. *International Journal of Thermal Sciences* [online]. 2015, 94, 139–146. ISSN 12900729. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijthermalsci.2015.03.001
- [31] *Nonadecane (CAS 629-92-5) - Chemical & Physical Properties by Cheméo* [online]. [vid. 2023-11-06]. Dostupné z: <https://www.chemeo.com/cid/63-469-2/Nonadecane#ref-kdb-pure>
- [32] *Heat Transfer Module User's Guide* [online]. 1998. Dostupné z: www.comsol.com/blogs
- [33] CHEN, Dafen, Jiuchun JIANG, Gi Heon KIM, Chuanbo YANG a Ahmad PESARAN. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2016, 94, 846–854. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.10.015
- [34] ZHU, Fen, Heng YAN, Liangde LIU a Xiangyun LIU. *Simulation of thermal behavior of a lithium-ion battery*. 2016.
- [35] *BMW i3 94 Ah (2016-2017) price and specifications - EV Database* [online]. [vid. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1068/BMW-i3-94-Ah>
- [36] LI, Shen, Niall KIRKALDY, Cheng ZHANG, Krishnakumar GOPALAKRISHNAN, Tazdin AMIETSZAJEW, Laura Bravo DIAZ, Jorge Varela BARRERAS, Mosayeb SHAMS, Xiao HUA, Yatish PATEL, Gregory J. OFFER a Monica MARINESCU. Optimal cell tab design and cooling strategy for cylindrical lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* [online]. 2021, 492. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2021.229594
- [37] MULPURI, Sai Krishna, Bikash SAH a Praveen KUMAR. Unraveling capacity fading in lithium-ion batteries using advanced cyclic tests: A real-world approach. *iScience* [online]. 2023, 26(10). ISSN 25890042. Dostupné z: doi:10.1016/j.isci.2023.107770
- [38] *Řidiči s elektromobily ujedou v Česku za rok přes 12 tisíc kilometrů – více než řidiči aut benzínových | Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.* [online]. [vid. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://www.cistadoprava.cz/tiskove-zpravy/ridici-s-elektromobily-ujedou-v-cesku-za-rok-pres-12-tisic-kilometru-%E2%80%93-vice-nez-ridici-aut-benzinovy/>
- [39] *How Long Do People Keep Their Cars? - iSeeCars.com* [online]. [vid. 2023-12-13]. Dostupné z: <https://www.iseecars.com/how-long-people-keep-cars-study>

- [40] *Germany 8-Year Bond Chart - Investing.com* [online]. [vid. 2023-12-15]. Dostupné z: <https://www.investing.com/rates-bonds/germany-8-year-bond-yield-streaming-chart>
- [41] ASWATH DAMODARAN. *Levered and Unlevered Betas by Industry* [online]. [vid. 2023-12-15]. Dostupné z: https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html
- [42] *Kurzy devizového trhu - Česká národní banka* [online]. [vid. 2023-12-13]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/financni-trhy/devizovy-trh/kurzy-devizoveho-trhu/kurzy-devizoveho-trhu/>
- [43] KOSNY, Jan, Nitin SHUKLA a Ali FALLAHI. *Cost Analysis of Simple Phase Change Material-Enhanced Building Envelopes in Southern U.S. Climates* [online]. 2013. Dostupné z: <http://www.osti.gov/bridge>
- [44] *Solar Energy Storage Battery / 94ah 3.7v Samsung Battery / Lithium Battery Prismatic - Battery Packs - Aliexpress* [online]. [vid. 2023-12-15]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/1005003127578252.html?spm=a2g0o.store_pc_groupList.8148356.1.2cd55b90taaWDL&pdp_npi=4%40dis%21CZK%21CZK+7%2C356.00%21CZK+7%2C356.00%21%21%21320.58%21320.58%21%40211b813b17025972301797454e87a2%2112000024245861810%21sh%21CZ%210%21
- [45] *1 Coolant Expansion Tank Tesla model S 1032227-00-A* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://stock-tesla.com/en/1-coolant-reservoir-assembly-1>
- [46] *24 Coolant pump Tesla model S, model S REST 1067473-00-H* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: https://stock-tesla.com/en/index.php?route=product/product&product_id=78017
- [47] *EV Battery Module Coolant Plate - Double / Fellten* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://shop.fellten.com/shop/coolantplate-ev-battery-module-coolant-plate-double-12801#attr=>
- [48] MUNRO & ASSOCIATES. *BMW i3 Teardown Analysis Study: 2020*.
- [49] *ACDelco Chladící kapalina oranžová DEX-Cool 10-101 (3.785L) - Moparshop.cz* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.moparshop.cz/acdelco-ostatni-kapaliny/acdelco-chladici-kapalina-oranzova-dex-cool-10-101--3-785l/>
- [50] *1 A/C compressor RWD Tesla model 3 1088198-00-0* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://stock-tesla.com/en/1-ac-compressor-m3-m3-1088198-00-o>
- [51] *2 Heat exchanger/chiller (CHILLER) assembly with valve needle positioner (magnetic type) Tesla model 3 1133855-00-B* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: https://stock-tesla.com/en/index.php?route=product/product&product_id=72837
- [52] *9 Hose (batt), HV batt return to 5 W/V Tesla Model 3, Model Y 1501334-00-D* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: https://stock-tesla.com/en/index.php?route=product/product&product_id=110769
- [53] *10 Exhaust air conditioner pipeline Tesla model 3 1092158-00-F* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://stock-tesla.com/en/10-ac-line-asy-discharge-m3-1092158-00-f-1>

- [54] *Chladivo R134a (12kg) / e-chladiva.cz* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.e-chladiva.cz/chladivo-r134a-12kg-e623.htm>
- [55] *Using Tesla thermal management system parts - EVcreate* [online]. [vid. 2023-12-26]. Dostupné z: <https://www.evcreate.com/using-tesla-thermal-management-system-parts/>
- [56] *Tesla Model S/X A/C Compressor - openinverter.org wiki* [online]. [vid. 2023-12-26]. Dostupné z: https://openinverter.org/wiki/Tesla_Model_S/X_A/C_Compressor
- [57] *Tesla Air Conditioning Power Consumption Explored* [online]. [vid. 2023-12-26]. Dostupné z: <https://www.evspeedy.com/tesla-air-conditioning-2/>
- [58] *Summer Survival Guide for Electric Cars: What A/C Does to Range* [online]. [vid. 2023-12-26]. Dostupné z: <https://www.recurrentauto.com/research/what-a-c-does-to-your-range>