

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2018

**ŠTĚPÁN
PANCE**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pance** Jméno: **Štěpán** Osobní číslo: **437719**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Chladicí okruhy hybridních a elektrických vozidel

Název bakalářské práce anglicky:

Cooling circuits of hybrid and electric vehicles

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši chladicích okruhů hybridních a elektrických vozidel.
2. Zaměřte se na uspořádání chladicích okruhů a jejich funkci.
3. V programu GT-Suite postavte a simulujte jednoduchý chladicí okruh elektrického vozidla.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Rastislav Toman, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.07.2018**

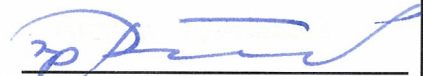
Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Rastislav Toman
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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.

24.4.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Chladicí okruhy hybridních a elektrických vozidel** zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne11.6.2018.....

..........

Štěpán Pance

Poděkování

Děkuji panu **Ing. Rastislavu Tomanovi** za jeho vstřícný přístup, rady a pomoc při zpracování bakalářské práce. Mé poděkování patří též mé rodině a blízkým přátelům za pomoc a podporu během studia.

**CHLADÍCÍ OKRUHY HYBRIDNÍCH
A ELEKTRICKÝCH VOZIDEL**

Anotace

V rámci této bakalářské práce jsou v první části formou literární rešerše popsány typy článků baterií s důrazem kladeným na použití v osobních automobilech. Rozdělení je provedeno se zaměřením na teplotní vlastnosti článku dle použité chemické technologie a též dle geometrie článku. V druhé části rešerše je vypracovááno rozdělení chladicích okruhů systémů řízení teploty baterií v hybridních a elektrických vozech s přehledem jejich využití na trhu.

Třetí a závěrečná část obsahuje návrh teoretického chladicího okruhu a jeho logika řízení pro baterii městského elektrického vozidla za použití programu GT-SUITE. Výsledkem návrhu jsou grafy tepelného chování baterie při testovacích jízdách cyklech.

Klíčová slova:

Hybridní vozidlo, Elektrické vozidlo, Systém řízení tepla baterie, Chlazení vzduchem, Chlazení kapalinou, GT-SUITE

Summary

The following graduation thesis consists of a research, where in the first part are described types of battery cells with an emphasis on use in automobiles. The distribution is done with a focus on the temperature properties of battery cells according to their chemical technology and also to their geometrical properties. The second part consists of research sorted by cooling circuit technologies used by battery thermal management systems in hybrid and electric vehicles with an overview of their use on the market. The third and final part contains a design of a theoretical cooling circuit and its control logic for a battery used in an urban electric vehicle using GT-SUITE program. The design results are graphs of thermal behaviours of the battery during test driving cycles.

Key words:

Hybrid vehicle, Electric vehicle, Battery thermal management system, Air cooling system, Liquid cooling system, GT-SUITE

Obsah

1.	Úvod.....	5
1.1	Úvod do problematiky	5
2.	Typy akumulátorových článků.....	6
2.1	Dělení podle chemické technologie.....	6
2.1.1	Olověný akumulátor.....	6
2.1.2	Nikl-kadmiový akumulátor (NiCd).....	7
2.1.3	Nikl-metal hydridový akumulátor (Ni-MH).....	7
2.1.4	Lithium-iontový (Li-ion) akumulátor.....	8
2.1.5	Lithium-polymerový akumulátor (Li-pol, LiPo)	9
2.1.6	Akumulátory s pevným elektrolytem - „solid state“	10
2.2	Dělení podle geometrie uspořádání článku.....	12
2.2.1	Cylindrické články	12
2.2.2	Prizmatické akumulátorové články.....	14
2.2.3	„Pouch cells“	15
3.	Rešerše chladících okruhů.....	16
3.1	Nároky na systém řízení teploty.....	17
3.2	Typy chladících okruhů.....	17
3.2.1	Srovnání chlazení vzduchem a kapalinou	18
3.2.2	Pasivní chlazení vzduchem.....	18
3.2.3	Aktivní chlazení vzduchem	20
3.2.4	Aktivní kapalinové chlazení	21
3.2.5	Chlazení přímou expanzí.....	26
3.2.6	„PCM“ chlazení – chlazení změnou fáze	27
3.3	Degradace baterií	28
3.4	Vliv typu chlazení na degradaci baterie.....	29

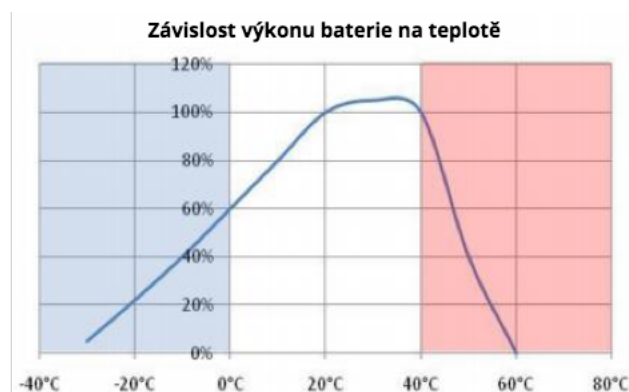
3. 4. 1	Shrnutí	30
4.	Praktická část – simulace chlazení baterie za jízdního cyklu v GT-SUITE .	31
4. 1	Návrh chladicího okruhu.....	31
4. 1. 1	Předpoklady modelu.....	32
4. 1. 2	Součásti chladicího okruhu.....	32
4. 2	Nastavení parametrů okruhu pro simulaci	32
4. 3	Výsledky.....	34
4. 3. 1	Výsledky simulace jízd s cykly WLTC – Class 3.....	34
4. 3. 2	Výsledky simulace jízd s cykly NEDC a HWY	36
5.	Závěr	38
	Seznam obrázků.....	39
	Seznam tabulek.....	40
	Seznam příloh.....	41
	Použité formulace a zkratky	42
	Citovaná literatura.....	43
	Příloha 1 – Schéma BTMS Tesla 85D.....	47
	Příloha 2 – Schéma modelu v GT-SUITE.....	49

1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou chladicích okruhů hybridních a elektrických vozidel. Stejně tak jako u konvenčních nebo hybridních automobilů, kde je nutno chladit spalovací motor, tak i u automobilů využívajících elektrický pohon je nutno chladit pohonné ústrojí – elektromotor, a především akumulátory baterie. Neustálý růst popularity HEV a EV, zapříčiněný především podporující legislativou, vytváří nový prostor na trhu s osobními automobily. Proto v současné době téměř každá automobilka nabízí někdy i celou řadu hybridních nebo plně elektrických modelů a výrazně investuje do vývoje dalších. Cílem bakalářské práce je provedení rešerše na téma chlazení baterií hybridních a elektrických vozidel, s tím spojené technologické výzvy, rozdílná řešení chladicích okruhů a technologií baterií pro různé typy vozidel a realizace v praxi.

1.1 Úvod do problematiky

Baterie poskytují potřebný zdroj elektrické energie elektromotorům. Při procesu vybíjení i nabíjení dochází k chemickým reakcím uvnitř baterií, které mají současně s přirozeným odporem za následek jejich ohřívání. Při použití současných chemických technologií je nezbytné baterie udržovat v teplotním spektru použitelnosti. Například u lithium-iontových baterií je tento rozsah přibližně 0-40 °C, ale rozsah ideálních provozních teplot baterií je ještě užší (řádově 15-35 °C viz *Obrázek 1*). Z toho je zřejmé, že teplotní rozdíl mezi teplotou baterie a teplotou okolí je velmi malý nebo dokonce záporný. Chlazení vzduchem z okolí tak může být na rozdíl od chlazení spalovacích motorů nedostatečné a je tedy případně nutné nalézt jiná řešení chladicího okruhu. [1]



Obrázek 1: Závislost výkonu baterie na teplotě [2]

2. Typy akumulátorových článků

Dělení článků baterií lze uskutečnit podle různých aspektů. Pro účely této práce jsou zpracovány pouze akumulátorové články – se schopností dobíjení. Základní požadavky na články akumulátorů pro použití v HEV a EV:

- Životnost a počet cyklů
- Rychlé a bezpečné nabíjení
- Vysoká hustota energie
- Nízká cena
- Recyklovatelnost / ekologická likvidace.

Dělení článků je provedeno podle dvou aspektů:

- a) chemické technologie
- b) geometrie

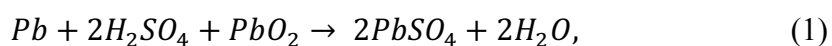
2. 1 Dělení podle chemické technologie

2. 1. 1 Olověný akumulátor

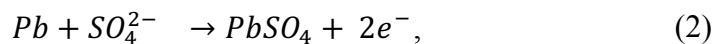
Jedná se o nejstarší známý akumulátor stále hojně využíván v dnešní době. Zápornou elektrodu tvoří porézní olovo, kladnou elektrodu tvoří oxid olovičitý – PbO₂. Elektrolytem je vodou ředěná kyselina sírová H₂SO₄, popřípadě její roztok zahuštěný do formy gelu. Dělí se především podle jejich použití, kde se liší vnitřní uspořádání akumulátoru, a zda se jedná o záložní, startovací (autobaterie pro startování automobilu) nebo trakční (golfová vozítka, vysokozdvizné vozíky, první elektromobily). Mezi jejich hlavní výhody patří poměr cena/wh, vyspělá a ozkoušená technologie, pomalé samovybití, schopnost krátkodobě poskytnout vysoké proudové hodnoty. Využívaly se v prvních elektromobilech a hybridních vozidlech jako např. v Lohner-Porsche Semper Vivus. [3]

Mezi největší nevýhody, s ohledem na využití v EV, patří jejich nízká energetická hustota, neekologičnost, vysoká váha, nízký počet cyklů a nutnost uchovávat v nabitém stavu. Proto se dnes v HEV a EV nevyužívají. Uplatnění však našly právě u golfových vozíků, u kterých nejsou zmíněné nevýhody důležité. [4]

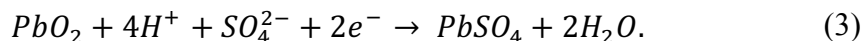
Celková reakce vybíjení [5]



na záporné elektrodě:



a na kladné elektrodě:

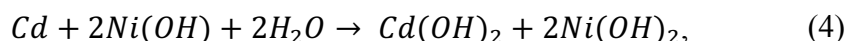


Při nabíjení probíhají uvedené reakce opačným směrem. [4] [5]

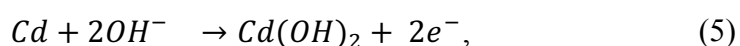
2. 1. 2 Nikl-kadmiový akumulátor (NiCd)

Tento typ akumulátoru je již spíše na ústupu, přestože má mnoho příznivých vlastností jako jsou: jednoduché a rychlé nabíjení, vysoký počet cyklů, celkovou spolehlivost dokonce i za nízkých teplot. Stále se využívá v přenosných rádiích, kamerách, fotoaparátech a zdravotních zařízeních. Přechod k ostatním typům je zapříčiněn především jeho obsahem toxických látek, trpí na samovybíjení, okolo 20 %/ měsíc, a na paměťový efekt – pokud je baterie dobíjena dříve, než je zcela vybita, zmenšuje svou kapacitu a zkracuje se její životnost. Aby se tomuto jevu zabránilo, je nutné vždy po několika neúplných cyklech baterii zcela vybit a nabít na 100 %. Má poměrně malou hustotu energie, je nutná pravidelná kontrola a servis, a proto se pro elektrická vozidla již nevyužívá. V minulosti se tyto články využívaly v několika francouzských vozech např. Peugeot 106 Electric a Renault Kangoo. [6]

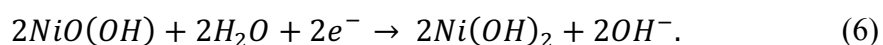
Celková rovnice vybíjení [7]



na záporné elektrodě:



Na kladné elektrodě:



Při nabíjení probíhají uvedené reakce opačným směrem.

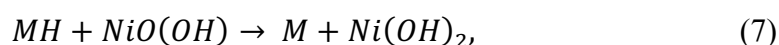
Ve většině aplikací ho nahrazují modernější Li-ion a především Ni-MH akumulátory, které jsou jejich přímým nástupcem. [4] [7]

2. 1. 3 Nikl-metal hydridový akumulátor (Ni-MH)

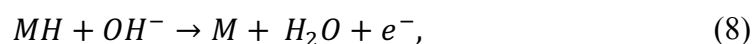
Tato technologie akumulátoru se snaží eliminovat negativní vlastnosti NiCd akumulátorů. Oba typy akumulátorů na bázi niklu mají dobré schopnosti krátkodobě odolávat nízkým anebo vyšším teplotám. V porovnání s NiCd je z důvodu nižší toxicity použitých materiálů a méně náročné výroby šetrnější k životnímu prostředí. Proto se lépe

přepравuje, jelikož manipulace s ní není svazována tolika legislativními pravidly. Jejich výroba je technologicky zvládnuta, avšak stále s prostory pro inovaci. Dále má o 30-40 % vyšší hustotu energie a menší paměťový efekt v porovnání s NiCd, ale je nutné provádět pravidelné úplné vybití a nabití – tzv. formátování.

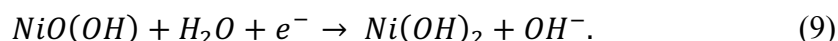
Mezi další negativa se řadí nutný servis, náchylnost na úplné vybití, limitování maximálním vybíjecím proudem, nejlépe pokud se proud pohybuje mezi 0,2 – 0,5 celkové kapacity. Dále má složitější algoritmus nabíjecího cyklu a nutnost uchovávání v chladném prostředí. Při dlouhodobém uchovávání za zvýšené teploty dochází k trvalé degradaci. Celková reakce vybíjení [8]:



na záporné elektrodě:



na kladné elektrodě:

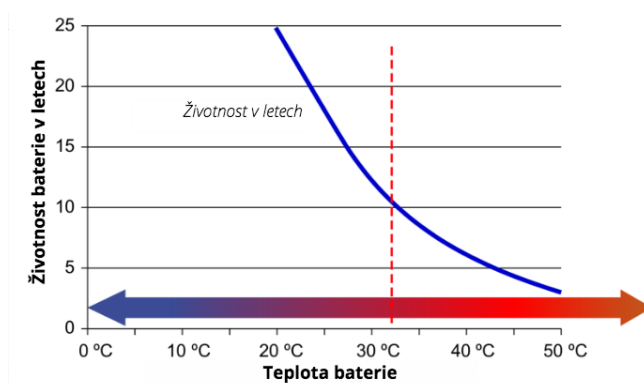


Při nabíjení probíhají uvedené reakce opačným směrem.

Záporná elektroda je tvořena kovovou slitinou (M), která s navázaným vodíkem vytváří směs hydridů (MH). Při nabíjení probíhají uvedené reakce opačným směrem. [4] [8]

2. 1. 4 Lithium-iontový (Li-ion) akumulátor

Přestože princip fungování baterie byl objeven již v roce 1912 G. N. Lewisem, její komerční verze byla uvedena firmou Sony až v roce 1991. Dá se říci, že dnes se jedná o nejspolehlivější běžně používanou technologii výroby akumulátorů a slibuje i další vývoj do budoucna. Její výhody pro EV jsou následující: vysoká hustota energie



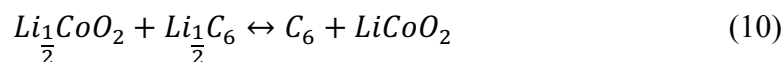
Obrázek 2: Životnost Li-ion baterií na teplotě prostředí [9]

(více než dvojnásobná oproti NiCd), nízké samovybíjení – do 5 %/měsíc, relativní bezúdržbovost – bez paměťového efektu, bez nutnosti periodického vybíjení. [10]

Mezi nevýhody patří: nutnost bezpečnostního obvodu pro každý článek (zvětšení baterie), tendence stárnout bez ohledu na použití – tento efekt je ovlivněn teplotou skladování, viz Obrázek 2. Dále se jedná o vysoké náklady na výrobu (předpokládá se snižování cen), jedná se o poměrně novou technologii a tek je stále v technologickém vývoji, avšak s možností dalších vylepšení.

Anoda je vyrobena z materiálů na bázi uhlíku či grafitu, katoda je vyrobena z oxidu lithia a elektrolyt je lithiová sůl v organickém rozpouštědle.

Základní zjednodušená chemická reakce [11]:

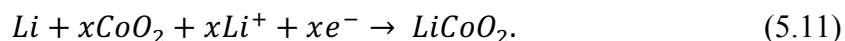


Každý článek baterie obsahuje vlastní kontrolní obvod, který monitoruje stav článku. Data shromažďuje a vyhodnocuje tzv. systém řízení baterie (BMS), který vyhodnocuje obecný stav celé baterie a řídí tak proces vybíjení, nabíjení a její teplotu. Část systému, který řídí teplotu baterie, se nazývá systém řízení teploty baterie (BTMS). [4] [11]

2. 1. 5 Lithium-polymerový akumulátor (Li-pol, LiPo)

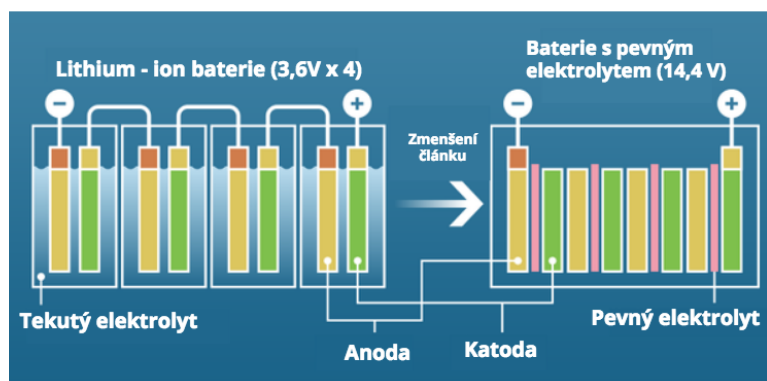
Největší změnou oproti ostatním bateriím je využití vodivého pevného polymeru jako elektrolytu. Toto je v praxi složitě realizovatelné, protože díky nízké vodivosti polymeru by baterie musela ideálně pracovat nad hranicí 60 °C, proto se pro funkci za běžných teplot přidává gelový elektrolyt pro zlepšení vodivosti. Největší výhodou tohoto řešení je možnost výroby až 1 mm tenkých článků, které se dají vrstvit do téměř libovolných tvarů, nízká celková hmotnost a bezpečnost. Tyto vlastnosti využívají především výrobci spotřební elektroniky, ale pro použití v elektromobilech se tato baterie příliš nehodí, protože kromě vysoké ceny a složité výroby poskytuje menší hustotu energie než klasická Li-ion baterie a stále neodstraňuje problém s tekutým (gelovým) elektrolytem. Proto se do budoucna počítá spíše s přechodem rovnou na baterie s pevným elektrolytem („solid state“). [4] [12]

Zjednodušená rovnice chemické reakce [12]



2. 1. 6 Akumulátory s pevným elektrolytem - „solid state“

Tato technologie je teprve ve fázi vývoje, avšak díky vysokým investicím automobilek s největší pravděpodobností pevné akumulátory můžeme očekávat v blízké budoucnosti ve velkém množství elektromobilů. Do vývoje této technologie investuje především Toyota, která uzavřela dohodu o intenzivní spolupráci s firmou Panasonic, se kterou plánují uvedení do sériové výroby v roce 2022. Další automobilky, které investují do vývoje této technologie, jsou BMW, Honda, Nissan a Fisker.



Obrázek 3: zjednodušené schéma Li-ion a pevné baterie [13]

Pevné akumulátory budou stále využívat Lithium ale na rozdíl od Li-ion technologie zde nebude tekutý ani gelový elektrolyt v žádné formě (ne jako v současných Li-pol). Jak je možno vidět ze schématu, viz *Obrázek 3*, a názvu baterie elektrolyt bude v pevné formě. Jeho složení a separace od elektrod je největší technologickou výzvou, protože stejně tak jako u Li-pol baterií musíme zajistit funkci za běžných a nízkých teplot, a přitom dbát na bezpečnost a ekologické předpisy.

Hlavní přínosy pevných akumulátorů by měly být: až 2x vyšší hustota energie než u současných Li-ion, šetrnost k životnímu prostředí, a především menší náchylnost na zvýšené teploty a vyšší počet cyklů. [13] [14] [15]

Úkolem této části práce bylo vypracovat přehled technologií a zjistit jaké z nich se vyskytují na trhu, a dalším úkolem bylo zjistit a porovnat jejich ideální pracovní teploty. V *Tabulce 1* je vypracovaný přehled HEV, PHEV a EV s použitou technologií baterií. Můžeme konstatovat, že u HEV dominuje technologie NiMH, naopak u PHEV a EV jednoznačně dominují Li-ion.

Z přehledu v *Tabulce 2* je zřejmé, že současné technologie jsou si provozními podmínkami velmi blízké, a že baterie „solid state“ by znamenaly revoluci v chlazení baterií elektromobilech.

Tabulka 1: Přehled technologií baterií používaných v HEV a EV [16] [17] [18]

	Výrobce	Model	Technologie akumulátorů
HEV	Toyota	Prius (I., II., III. gen.)	NiMH
		IV. gen	NiMH/Li-ion
	Honda	Civic (1. 2. gen)	NiMH
		Insight (1. 2. gen)	NiMH
	Ford	Escape	NiMH
		Fusion	NiMH
	Hyundai	Sonata Hybrid	Li-pol
Daimler AG	ML450, S400	NiMH	
PHEV	Toyota	Prius	Li-ion
	BMW	X6	NiMH
		i8	Li-ion
	Ford	Escape PHEV	Li-ion
	Hyundai	Sonata Hybrid	Li-pol
EV	GM	Chevy-Volt	Li-ion
	Tesla	Roadster (2009)	Li-ion
		Model S, X, 3	Li-ion
	BMW	i3	Li-ion
	VW	e-Golf	Li-ion
	Nissan	Leaf	Li-ion
	Renault	Twizy	Li-ion
	Hyundai	Ioniq	Li-ion

Tabulka 2: Kritické a ideální meze teplot provozu [4] [19] [20]

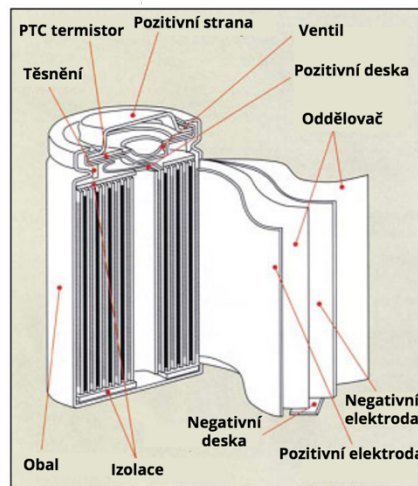
Technologie	Min. kritická teplota [°C]	Min. ideální teplota [°C]	Max. ideální teplota [°C]	Max. kritická teplota [°C]
Olověné	-20	10	30	50
NiCd	-40	0	40	65
NiMH	-20	10	30	65
Li-ion	-20	10	30	60
Li-pol	0	10	30	60
„Solid state“	-40	neznámá	neznámá	170

2. 2 Dělení podle geometrie uspořádání článku

Jelikož se články pro použití v automobilech musejí řadit do modulů a dále pak sériově či paralelně zapojí do výsledné baterie, jejich geometrie je také velice důležitým aspektem, který určuje výsledný tvar a velikost baterie a také jakým stylem je nutné články chladit [21]

2. 2. 1 Cylindrické články

V současné době se jedná o jednu z nejrozšířenějších technologií výroby akumulátorů pro EV. Velkou zásluhu na tom má značka Tesla, která v současnosti využívá sériového spojování tisíců Li-ion článků za sebe. Tato technologie je již ověřena desetiletími, a proto je výrobcí tak hojně využívána.



Obrázek 4: schéma Li-ion cylindrického článku [13]

Nevýhodou válcového tvaru těchto článků je výsledná velikost celé baterie, protože se vytvářejí mezi články mezery „nevyužitého prostoru“, který zvětšuje celkový objem baterie.

Tato nevýhoda je však současně i výhodou, jelikož tak vzniká prostor pro aktivní či pasivní chlazení celé baterie.

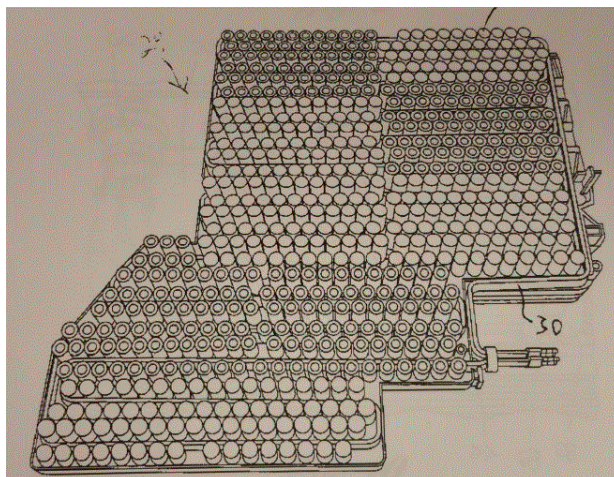
Mezi nejrozšířenější používané třídy se řadí: 18650, 21700 (2170), 26700 - první dvojčíslí značí průměr článku v mm, druhé dvojčíslí značí výšku článku v mm.

Globálně nejrozšířenějším typem cylindrického článku je typ 18650, které využívá Tesla ve svých modelech S a X nebo například český výrobce autobusů pro veřejnou dopravu SOR, avšak většina výrobců baterií pro automobilový průmysl (Tesla, Panasonic, Samsung) přechází spíše na typ 21700 pro jeho lepší poměr

kapacita/objem – 6000 mAh/97 cm³ který s porovnáním s 3000 mAh/66 cm³ má o 35 % energetickou hustotu na jednotkový objem baterie. Ten již využívá např. Tesly nejnovější Model 3. [22]

Nejobjemnější 26700 se již využívá v mnohem menší míře. Především proto, že výroba širších článků je technologicky náročnější a dražší. Naopak výhodou je lepší teplotní stabilita společně s lepší odolností při vysokých zatížení. Proto se prioritně využívají v součástkách vyrovnávajících zátěž systému. [21] [22]

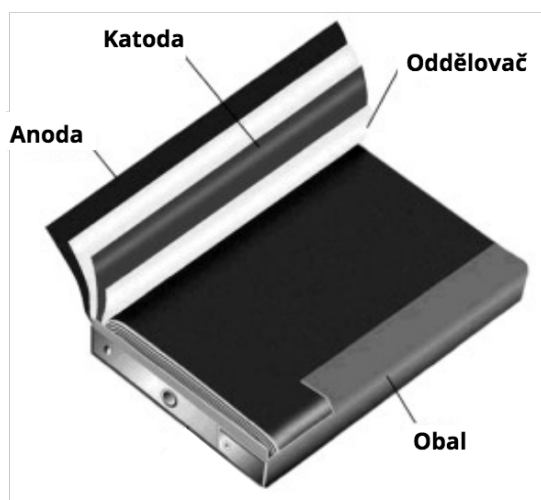
Na *Obrázek 5* je vidět patentované řešení automobilky Tesly uspořádání článků do tzv. modulů, které bylo unikátní kvůli vysokému počtu spojených článků. Z *Obrázek 5* je možno vyzorovat ještě okruh pro aktivní chlazení procházející celým modulem. Moduly se pak řadí do tzv. „battery packu“ – v této práci nazývané baterií. Baterie Modelu S 85D se skládá ze 16 takovýchto modulů. [23]



Obrázek 5: Uspořádání článků v modulu s aktivním chlazením vozu Tesla [23]

2. 2. 2 Prismatické akumulátorové články

Tato technologie výroby článku se používá od konce minulého století. Dokonale splňuje požadavky pro aplikaci ve spotřební elektronice, pro kterou byla vyvinuta – tenký profil podlouhlého rozměru zasazený do utěsněného hliníkového pouzdra. Každá firma vyrábí tyto články více či méně odlišnou chemickou technologií pro konkrétní aplikace. Uplatňuje se v různých modifikacích také v EV, kde se dá využít plošné seřazení s mezerami pro chlazení. Baterie potřebují tyto mezery také proto, že během zátěže a vlivem teploty mění svůj objem, a to až o 3-4 %.



Obrázek 6: Schéma prismatického článku [21]

Jejich potenciál do budoucna potvrzuje opět spolupráce firem Toyota a Panasonic, kdy obě firmy budou investovat mnoho prostředků do vývoje prismatických článků nové generace a počítá se s jejich aplikací ve vozech Toyota do několika let. Je možné, že v nich bude použita právě technologie článku s pevným elektrolytem („solid state“), na které tyto firmy také spolupracují. [21] [24]

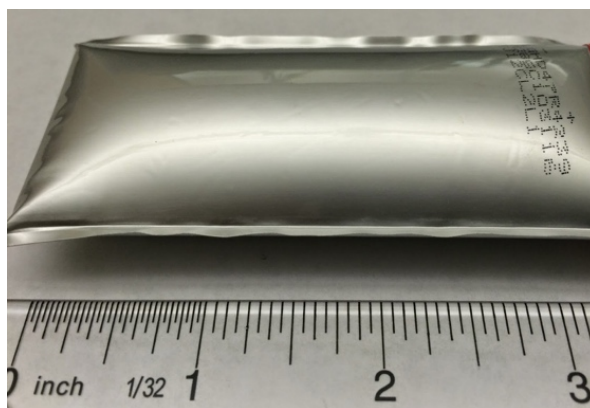
2. 2. 3 „Pouch cells“

Tato konstrukce baterií představuje nejefektivnější uspořádání článku s ohledem na zaujatý prostor. Neexistuje žádný standardizovaný rozměr článku, každá firma vyrábí své vlastní podle požadavků zákazníka. Většinou se vyrábí technologií Li-ion, Li-pol nebo jejich kombinací. Chování a vlastnosti se liší podle jejich velikosti a způsobu použití, ale obecně platí, že při jejich použití je třeba vzít v úvahu 8-10 % změnu objemu „nafukováním“ po přibližně 500 cyklech. Pro ideální funkci je nutné, aby na sebe jednotlivé články vyvíjely tlak a zefektivnily se tak chemické procesy probíhající uvnitř.



Obrázek 7: Článek „pouch cell“ [21]

Tento typ akumulátorů je vhodný pro aplikace s požadavky na vysoký proud, a co nejnižší hmotnost – například ve dronech. V automobilovém průmyslu se komerčně ještě nevyskytuje, ale využívá se v závodech Formule E a to především díky schopnostem poskytovat vysoké proudy avšak na úkor své životnosti. Dle mého názoru se dočkáme jejich využití u drahých sportovních hybridů nebo dokonce elektromobilů určených pro okruhové použití. Na *Obrázek 8* je zobrazen extrémně nafouknutý vadný článek. [21] [25]



Obrázek 8: „Nafouknutý“ článek „pouch cell“ [26]

3. Rešerše chladících okruhů

Životnost baterií, výkon, jejich cena a kapacita ovlivňuje ty samé aspekty celého vozu. Teplota baterie ovlivňuje její výkon při vybíjení, energii ale i její nabíjení například rekuperací brzděním vozidla. Tyto parametry přímo ovlivňují jízdní vlastnosti vozu stejně tak, jako jeho dojezd a spotřebu. Z těchto důvodů by se teplota baterie měla pohybovat ve spektru jejích ideálních provozních teplot. Tento interval je specifický pro každý typ baterie a je uváděn výrobcem baterie. Obecně je to možné vztáhnout na interval $20\text{ °C} - 40\text{ °C}$. Pokud baterie operuje krátkodobě mimo tento interval, ale ve spektru jejích extrémních provozních teplot (obecně $-20\text{ °C} - 60\text{ °C}$), není to ideální pro její životnost či výkon a negativně se to projeví i na dojezdu a spotřebě vozidla. Přestože výrobce vozu uvádí jako možné provozní teploty ty extrémní, většina z nich se snaží vůz navrhnout tak, aby baterie pracovala právě v intervalu ideálních provozních teplot. Tomu napomáhá vhodné umístění do vozu a geometrie baterie. To však samotné nestačí a je nutné navrhnout a implementovat systém, který by baterii monitoroval, chladil anebo ohříval – systém řízení tepla baterie (anglicky „Battery thermal management system“ - BTMS). Ten komunikuje jak s řídicí jednotkou, tak i se systémem pro řízení a monitorování baterie, který se skládá z mnoha senzorů a vyhodnocuje i data z obvodů jednotlivých článků. Komplexnost a sofistikovanost těchto systémů se liší od použité technologie baterií tím, zda se jedná o sériový, či paralelní hybrid, plug-in hybrid nebo elektrické vozidlo. V minulém desetiletí nebylo neobvyklé vozidlo navrhovat pouze pro specifický trh, kterým bývala často například Kalifornie v USA. Klimatické podmínky zde jsou po celý rok konzistentní s průměrnými denními teplotami (Los Angeles) pohybující se v rozmezí $15\text{ °C} - 25\text{ °C}$. [27] Z toho vyplývá, že vozidla, která byla navržena do těchto klimatických podmínek, jejich BTMS bude navržen se zaměřením spíše na chlazení než na ohřev baterie. [28] [29]

Naopak kdybychom navrhovali BTMS například pro severské země jako je Norsko, kde se průměrná denní teplota v Oslu během roku pohybuje v rozmezí $-5\text{ °C} - 15\text{ °C}$ [30], je jasné, že BTMS by měl být navržen spíše s ohledem na ohřev baterie.

V dnešní době však většina automobilek navrhuje své modely pro globální prodej, proto i jejich systémy řízení teploty baterie by měly splňovat veškeré nároky na provoz za většiny klimatických podmínek. [28] [29]

3. 1 Nároky na systém řízení teploty

K návrhu systému řízení tepla baterie musíme přistupovat s ohledem na několik aspektů. Jeho úkolem je udržovat baterii v intervalu ideálních provozních teplot, a to s rovnoměrnou teplotou v celé baterii. S nerovnoměrnou teplotou v celé baterii mají jednotlivé články různé odpory, a proto se i jinak vybíjejí. Články tak nejsou zatěžovány rovnoměrně a dochází tak k nerovnoměrnému vybíjení a urychlené degradaci. Dále celý systém musí být kompaktní, lehký a navržený tak, aby se se svou geometrií a rozměry vešel do prostoru uvnitř vozu. Dále musí být ekonomický – tak aby nespotřeboval příliš elektrické energie, spolehlivý, s dobrým přístupem ke komponentům, které vyžadují servis. Celý obal baterie musí být bezpečný – utěsněn proti vodě a dalším vlivům klimatu, ale zároveň odvětráván, pokud dojde k úniku toxických plynů z článků.

Jak vyplývá z intervalů provozních teplot článků, ani příliš nízké teploty nejsou pro fungování baterie vhodné. Zejména při dobíjení je pro většinu baterií nutná teplota nad 0 °C a proto, většina systémů je vybavena funkcemi jak ohřevu, tak chlazení. U baterií dobíjených ze sítě (EV a PHEV) v teplotách pod 0 °C je nutné baterii nejdříve vyehřát vestavěným vytápěním a až poté začít nabíjet. [28] [29]

Technologických řešení je hned několik a jsou popsány v následujících kapitolách.

3. 2 Typy chladících okruhů

Chladicí systémy se dají kategorizovat podle mnoha aspektů. Nejčastěji se používá dělení na pasivní a aktivní systémy podle toho, zda BTMS přímo ovlivňuje teplotu chladicího média a dále pak právě podle typu chladicího média. To z pravidla bývá vzduch nebo kapalina, ale může se jednat i o materiál s přeměnou fáze (skupenství) a jejich kombinace. Dále se systémy mohou odlišovat tím, jaký kontakt je mezi chladicím médiem a článkem baterie. V případě přímého kontaktu musíme zajistit, aby médium bylo dielektrikum – suchý vzduch, v případě kapalin – olej. V případě nepřímého kontaktu se může jednat o vodu, etylenglykol nebo provozní náplně do klimatizace. Médium může obtékat celou baterii, skupiny článků a nejlépe každý jednotlivý článek, protože se klade vysoký důraz na udržení rovnoměrného odporu článků v celé baterii, který závisí na teplotě. Při návrhu vhodného chladicího okruhu pro vozidlo je velice důležité zvážit všechny požadavky vozu na parametry BTMS, který slouží nejen k chlazení baterie, ale

i jejímu ohřevu, a to i s ohledem na zachování vysoké bezpečnosti celého vozidla. V následujících částech jsou popsána používaná inženýrská řešení s pozorností kladenou především na chlazení. [28] [29]

3. 2. 1 Srovnání chlazení vzduchem a kapalinou

Při laboratorním testování bylo srovnáváno chlazení olověných akumulátorů vzduchem a přímým chlazením olejem. Na základě úvahy potřebného výkonu chlazení a tlakových ztrát byl vypočítán požadovaný hmotnostní průtok $50 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ což odpovídá objemovému průtoku $43 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ vzduchu (v automobilu prakticky nereálném), o teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Při použití běžných korelací pro turbulentní proudění součinitel přestupu tepla - α vychází přibližně $\alpha = 25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Při chlazení olejem je dosaženo při stejném hmotnostní průtoku součinitel přestupu tepla 2,3-krát vyšším – $\alpha = 57 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ při objemovém průtoku pouze $0,057 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Při hypotetickém přímém chlazení akumulátoru vodou by bylo dosaženo součinitele až 15-krát vyšším ($\alpha = 390 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) oproti chlazení vzduchem. Při nepřímém chlazení se součinitel sníží z důvodu tepelných odporů stěn trubek média a nedokonalým kontaktem mezi trubkou a článkem. [28]

Základní rovnice prostupu tepla

$$\dot{Q} = k S \Delta T \quad (3.12)$$

\dot{Q} Teplo, které projde plochou za jednotku času [W]

k Součinitel prostupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]

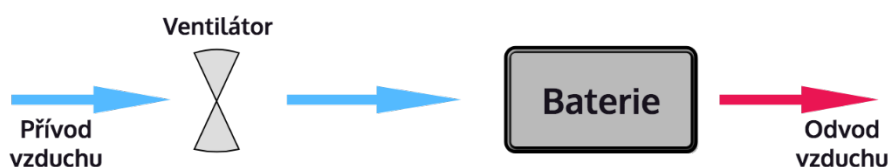
S Plocha prostupu tepla

ΔT Teplotní diference [K]. (31)

3. 2. 2 Pasivní chlazení vzduchem

Jedná se nejjednodušší formu chlazení baterie v elektromobilech. Jako médium se ve většině případů používá vzduch, který je přiváděn buď z okolí nebo z kabiny vozidla. Přestože je vzduch v kabině ohříván nebo chlazen klimatizací, stále se taková konstrukce považuje za pasivní systém. Pokud vzduch není během protékání baterií rozdělen a chladí tak celou baterii najednou, jedná se o nejjednodušší – sériové uspořádání – viz *Obrázek 9*. Pokud se při vstupu do baterie proud vzduchu rozdělí tak, aby chladil jednotlivé moduly nebo části baterie odděleně, jedná se o paralelní systém. Tímto způsobem lze dosáhnout více rovnoměrného chlazení v baterii. Jedním ze zdokonalení tohoto řešení, je řešení pro ohřev baterie kdy vzduch cirkuluje v baterii pouze v uzavřeném oběhu. Vzduch na výstupu

se nesmí za žádných okolností dostat zpět do kabiny. Pasivní chlazení má také funkci ventilace baterie a může tak obsahovat nebezpečné nebo jedovaté výpary z článků. Použití pasivního kapalinového okruhu není běžné. Mezi hlavní výhody pasivních systémů patří především jejich jednoduchost, nízká cena, spolehlivost a jednoduchá údržba – pouze pravidelná kontrola filtrů a ventilátoru. [28] [29]



Obrázek 9: Schéma pasivního chlazení vzduchem (28)

Nevýhody jsou: nízká účinnost, nerovnoměrné chlazení článků v objemných bateriích – nepříliš vhodné pro EV. Vozy, kde je vzduch přiváděn z kabiny za horkých dní, mohou baterie trpět přehříváním, protože teplota kabiny může i výrazně převyšovat teplotu okolí. A proto se využívají především u hybridních vozidel, kde z baterie nejsou odebírány vysoké proudy, a tudíž nevyžadují tak výkonný BTMS, ale nejsou výjimkou ani u levných elektrických vozidel. [28] [29]

Tabulka 3: Výhody a nevýhody pasivního chlazení vzduchem

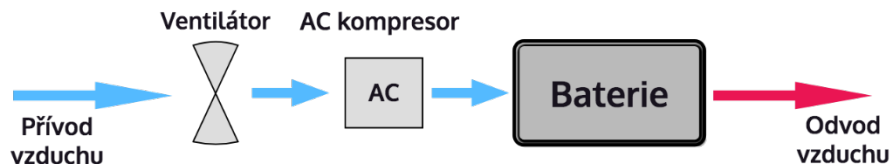
Výhody	Nevýhody
Jednoduchost	Nízká účinnost
Nízká cena – vhodné pro levné vozy	Vysoká cena
Nenáročná údržba	Nedostatečné pro EV

Příklady vozů využívajících pasivní chlazení:

- Toyota Prius všech generací (Stejně tak jako veškeré HEV Toyota a Lexus)
- Honda CRZ
- Nissan Leaf
- Volkswagen e-Golf.

3. 2. 3 Aktivní chlazení vzduchem

Další kategorií jsou systémy aktivního chlazení vzduchem. Systém se považuje za aktivní, pokud může podle pokynů řídicí jednotky ovlivnit teplotu média – ohřátím nebo chlazením, jak ukazuje velmi zjednodušené schéma na *Obrázek 10*. Klimatizace vozu poskytuje část svého výkonu pro ochlazení vzduchu vstupujícího do baterie.

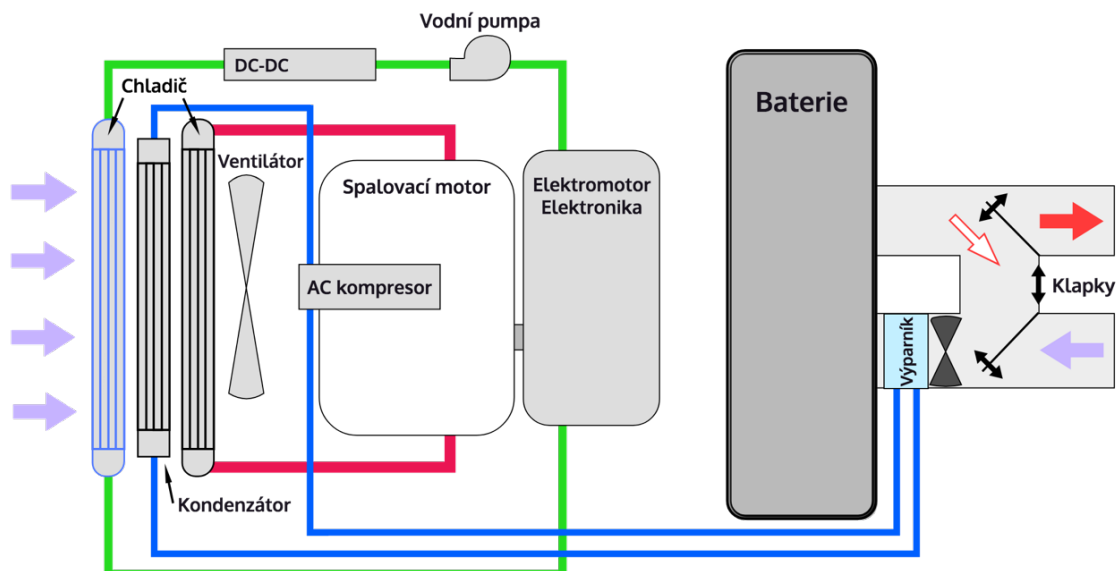


Obrázek 10: Schéma aktivního chlazení vzduchem [28]

Jako příklad konkrétního okruhu je zde uvedený BTMS Fordu Escape Hybrid (r.v. 2008). Jak je vidět ze schématu na *Obrázek 11*, vozidlo je vybaveno třemi chladicími okruhy:

- pro spalovací motor, známý z konvenčních vozidel
- pro elektromotor a elektroniku
- okruh baterie s výparníkem klimatizace.

Součástí okruhu baterie jsou klapky ke směřování vzduchu zpět do baterie nebo z vozu do okolí. [28] [29]



Obrázek 11: Chlazení hybridního pohonu – Ford Escape Hybrid (r.v. 2008) [32]

Mezi hlavní výhody takového řešení je zvýšená účinnost chlazení vlivem většího teplotního rozdílu vzduchu a článků. Takové řešení je vhodné pro HEV i při jízdě

za vysokých teplot, protože řeší problém pasivního chlazení při vysokých teplotách vzduchu v okolí nebo kabiny. [32]

Míra komplexity je stále na rozumné úrovni, protože systém pracuje na principu běžné klimatizace. Nároky na údržbu jsou náročnější než u pasivních systémů. Je třeba pravidelně kontrolovat ventilátor, klapky a veškeré filtry, zda nejsou zanesené. Přestože tento systém má vyšší účinnost než pasivní chlazení vzduchem, automobilky častěji volí variantu aktivního kapalinového chlazení především z důvodu ještě vyšší účinnosti.

Tabulka 4: Výhody a nevýhody aktivního chlazení vzduchem

Výhody	Nevýhody
Střední účinnost	Poměrně komplexní
Schopnost chlazení i při vysokých teplotách kabiny	Údržba
Vhodné pro HEV	

Příklady vozů využívajících pasivní chlazení:

- Ford Escape Hybrid (r. v. 2008, HEV) [32]
- Nissan e-NV200 (r. v. 2015, EV) [33]

3. 2. 4 Aktivní kapalinové chlazení

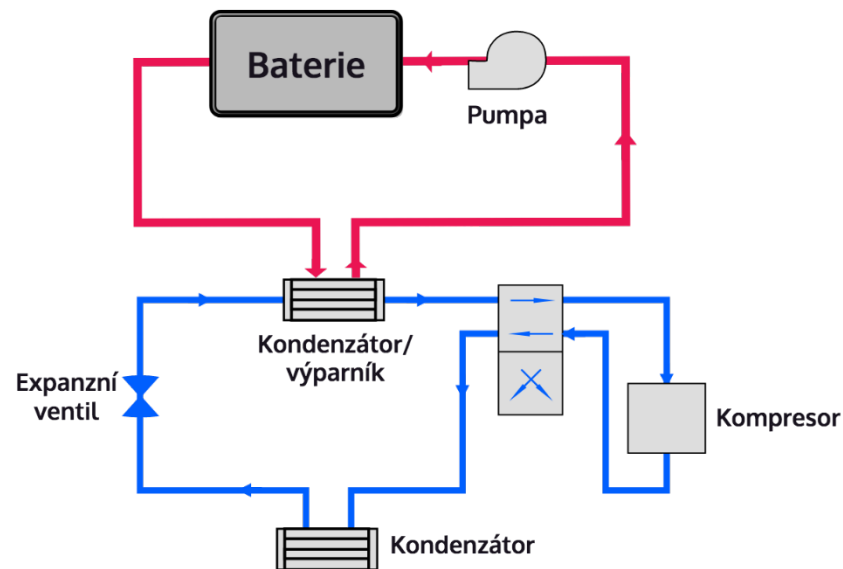
Aktivní chlazení kapalinou se stává nejčastěji používaným řešením pro PHEV a EV a to z důvodu, že tyto vozidla odebírají z baterie vyšší proudy a baterie se tak více zahřívají, než u hybridních vozů. Vývojem aktivních BTMS systémů se zabývá většina automobilek ale i mnoho externích firem jako např. Valeo nebo Bosch protože se očekává, že tento segment bude dále růst společně s podílem EV na trhu automobilů. Proto tomuto typu chlazení bude v této práci věnována větší pozornost.

Aktivní kapalinové chlazení využívá také poměrně nová automobilka Tesla, která je bez pochyby jedním z nejvýznamnějších výrobců elektromobilů na trhu. Jak je již zmíněno v kapitole 2 o cylindrických článcích, kde je zobrazen patentový návrh chlazení jednoho z modulů baterie na *Obrázek 5*.

Kapalinové chlazení je to v porovnání s ostatními komplexnější řešení, to znamená i finančně náročnější. To je i důvod, proč některé dostupné EV toto řešení nenabízejí. Z bezpečnostních i konstrukčních důvodů se u sériových automobilů využívá nepřímého aktivního chlazení článků. Toto řešení zvyšuje nároky na údržbu a též může nastat únik média do baterie. [28] [29]

Zpravidla se BTMS aktivního kapalinového chlazení skládá ze 3 částí:

- Okruh pro chladicí médium, které nepřímo chladí články baterie.
- Okruh klimatizace s funkcí chlazení okruhu č. 1.
- Systém vytápění – přímé vytápění článků odporovými vodiči nebo nepřímé – ohřevem kapaliny v okruhu č. 1 která pak zajistí ohřev baterie.

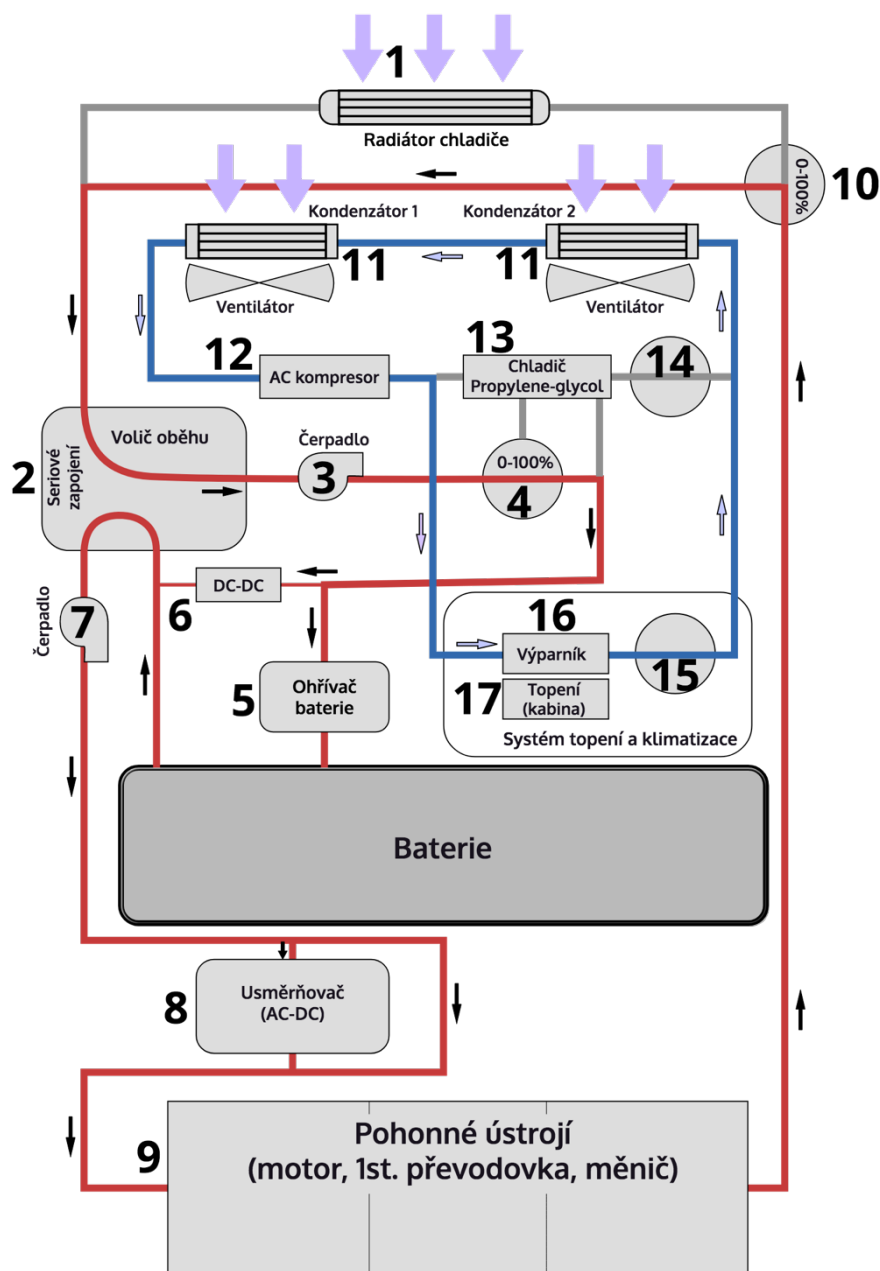


Obrázek 12: Schéma aktivního chlazení kapalinou [29]

3. 2. 4. 1 Aktivní chladicí okruh – Tesla 85D

V této části je dopodrobna popsán chladicí systém vozu Tesla 85D, podle schématu na *Obrázek 13*, který velmi dobře slouží k prezentaci a porozumění součástí a funkce aktivního chladicího okruhu. Baterie se skládá z cylindrických článků 18650 a jako chladicí médium je použit propylenglykol. [34]

- 1. Primární chladič** – Radiátor se nachází v přední části automobilu za maskou nárazníku. Nemá vlastní ventilátor, proto chlazení probíhá za pomoci obtékání vzduchem za jízdy. Médium může být přesměrováno pomocí ventilu č.10.
- 2. Volič cirkulačního módu** – tento díl slouží k přepínání mezi sériovým a paralelním okruhem. Pokud je zapojen sériově, náplň proudí od radiátoru 1 do pumpy (č. 3), dále do baterie až do pumpy č.7. V paralelní konfiguraci prochází od č.1 přímo do pumpy č.7 a baterie s pumpou č.3 tvoří vlastní uzavřený okruh.
- 3. Pumpa chladicího média – 12V** – Pumpa s variabilním průtokem.



Obrázek 13: Aktivní kapalinového chlazení – Tesla Model S 85D [34]

4. + 10, 14, 15 - Ventil – Přepíná nebo uzavírá větev okruhu.
5. Ohřivač – Má výkon až 6kW, slouží k ohřívání chladicí kapaliny na vstupu do baterie – pokud je to nutné – při nabíjení či jízdě v nízkých teplotách nebo na pokyn řidiče, pokud chce, aby baterie poskytovala maximální výkon.
6. Měníč DC-DC – Mění vysoké napětí z baterie na napětí 12V pro palubní elektroniku.
7. Pumpa chladicího média – 12V – tato pumpa slouží k pohonu média při paralelním zapojení nebo jako záložní při poruše č.3. Při sériovém zapojení běží stejnou rychlostí jako č.3.

8. **Usměrňovač AC-DC** – je použit k usměrnění střídavého napětí ze sítě při nabíjení baterie, která vyžaduje nabíjení proudem stejnosměrným. Tato součástka je taktéž chlazená, aby nedošlo k přehřátí elektroniky při nabíjení vysokými proudy.
9. **Pohonné ústrojí** – chladicí médium nejprve vstupuje do elektromotoru, kde chladí stator a poté pokračuje do invertoru. Tesla monitoruje teploty jak na vstupu, tak na výstupu.
11. **Kondenzátor klimatizace** – Slouží k ochlazení média klimatizace. Je vybaven přídatným 12V ventilátorem, k jehož využití dochází při nehybnosti či nedostatečné rychlosti vozidla. Ve vozidle jsou dva takovéto kondenzátory, každý před předním kolem vozu. Přívod vzduchu je regulován žaluziemi, které se mohou zcela uzavřít pro lepší aerodynamiku vozu.
12. **Elektrický kompresor klimatizace** – Má dvě funkce. Slouží ke chlazení kabiny společně s č.16 nebo ke chlazení okruhu baterie pomocí č.13. V případě potřeby je schopný plnit obě funkce zároveň. Pokud jsou nároky na chlazení minimální, kompresor je odstaven.
13. **Výměník tepla propylen – glykol** – slouží k chlazení okruhu baterie. Tato část okruhu může být zcela uzavřena pomocí ventilu č.14. Dochází zde k výměně tepla mezi médiem klimatizace a médiem ke chlazení baterie.
16. **Výparník klimatizace** – chlazení vzduchu vstupujícím do kabiny
17. **Topení pro kabinu** – ohřev vzduchu vstupujícím do kabiny, výkon 6kW. [34]

Monitorování důležitých teplot:

Celý chladicí okruh je opatřen mnoha nejen teplotními senzory. Ty poskytují potřebné informace BTMS, který pak vyhodnotí řízení celého okruhu. Zde jsou uvedeny příklady nejdůležitějších hodnot teploty. [34]

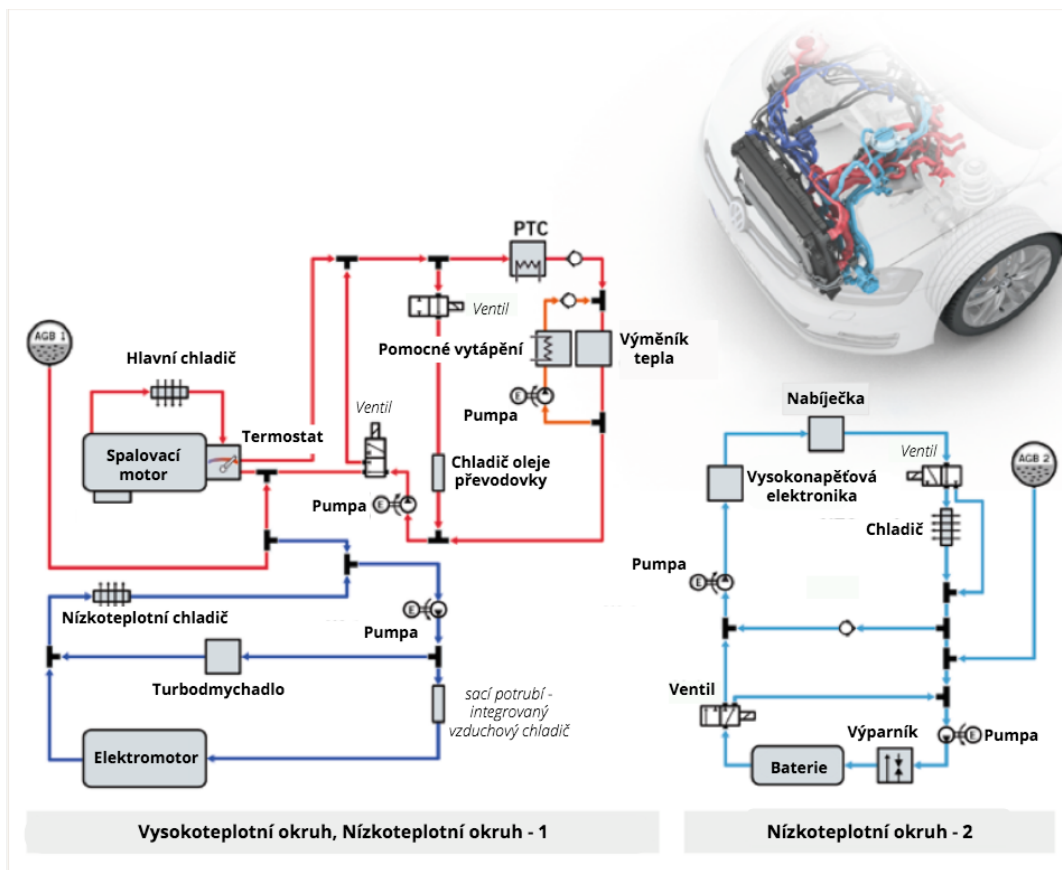
Cíl pasivního chlazení: 30 °C – Této teploty se snaží systém dosáhnout pasivním režimem. Pokud baterie je pod touto hodnotou, BTMS využívá teplo generované pohonným ústrojím (č.6, č.8 a č.9) a chladicí kapalina neprotéká radiátorem č.1.

Cíl aktivního chlazení: 52 °C – toto je horní hranice teploty baterie, BTMS se snaží zamezit překročením této teploty aktivním chlazením. Aktivuje se spínací ventil č.14, ventil č.4 přesměruje podíl chladicí kapaliny do výměníku č.13. a ventilátory č.11 zrychlí.

Pokud chladicí okruh pracuje již na 100 % a chlazení není dostatečné, omezí se rekuperace a maximální výkon vozu.

Cíl aktivního ohřevu: 8 °C – pokud hodnota teploty baterie klesne pod tuto hodnotu, sepne se topení pro oběh baterie, aby chladicí médium ohřál. Je pravděpodobné, že se dá pomocí funkce „prodloužení dojezdu“ (z angl. Range mode) toto topení vypnout a spoléhat, že se baterie dostatečně ohřeje při odběru proudu a pomocí tepla, které vyprodukuje pohonné ústrojí. Vůz však omezí svůj výkon a sníží se účinnost rekuperace (dobíjení baterie neprospívá, pokud je podchlazená). Schéma zapojení v jiných režimech jízdy jsou uvedeny v *Příloze 1*. [34]

Dalším příkladem vozu využívající kapalinové chlazení PHEV je Volkswagen Golf GTE. Hybridní vozy samozřejmě využívají konvenční spalovací motor, který má vlastní chladicí okruh. Z *Obrázek 14* je zřejmé, že chladicí okruhy pro spalovací motor a elektromotor jsou propojeny, ale dokáží pracovat odděleně, naopak chladicí okruh baterie je zcela samostatný a chladí veškerou vysokonapěťovou elektroniku. Potvrzuje, že výrobci nevyužívají teplo produkované ze spalovacího motoru k ohřevu baterie.



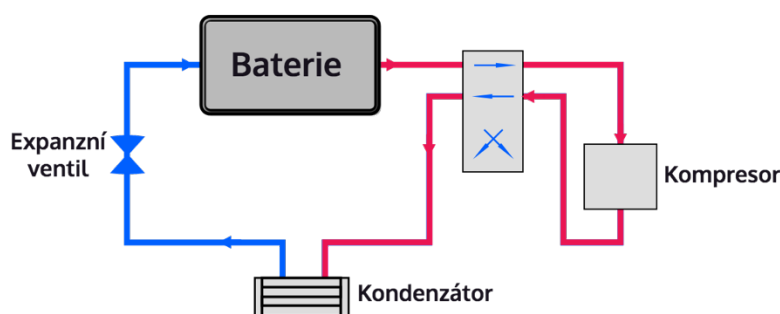
Obrázek 14: Schéma chladicích okruhů hybridního vozu VW Golf GTE [35]

Tabulka 5: Výhody a nevýhody aktivního chlazení kapalinou

Výhody	Nevýhody
Vysoká účinnost + rovnoměrné chlazení	Komplexní řešení
Schopnost chlazení i ohřevu	Vysoká cena
Vhodné pro PHEV a EV	

3. 2. 5 Chlazení přímou expanzí

Využívá podobného principu kapalinového chladicího systému a také obsahuje okruh s klima-kompresorem. Chlazení přímou expanzí na rozdíl od kapalinového chlazení používá v okruhu přímo samotné chladicí médium. Systém se skládá z kompresoru klimatizace, voliče režimu chlazení, kondenzátoru a expanzního ventilu. Přínosem tohoto typu chlazení je značné zjednodušení konstrukce, s tím spojená úspora hmotnosti, vysoká účinnost a efektivita. [29]



Obrázek 15: Schéma chladicího okruhu přímou expanzí [29]

Prvním sériově vyráběným vozem s chlazením přímou expanzí se stalo BMW i3. Chladicí okruh používá shodné médium s náplní klimatizace. Z toho plyne i další výhoda, a to standardní servis a doplňování média.



Obrázek 16: BMW i3 [36]

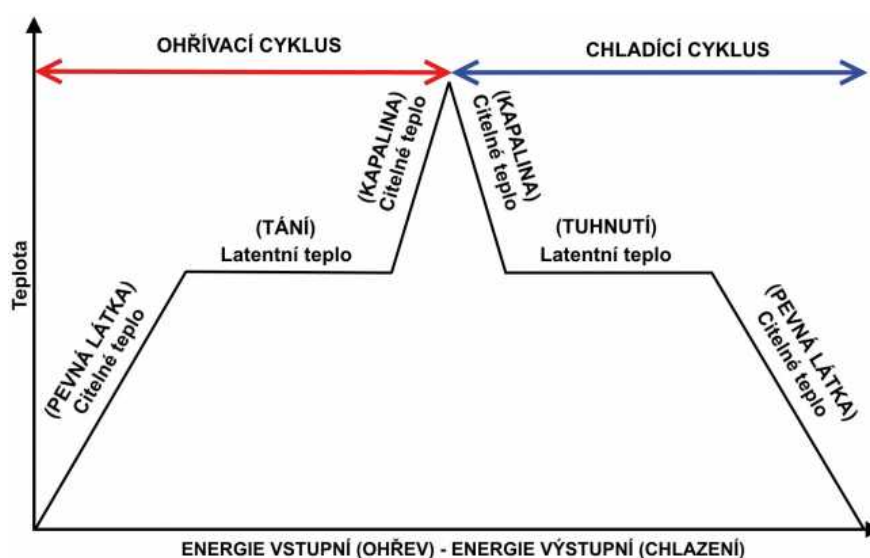
Toto řešení však neumožňuje, aby baterie byla médiem vyhřívání, proto je vytápění celé baterie řešené elektricky pomocí odporových kabelů. Systém tedy nemůže využívat například zbytkového tepla elektromotoru a jeho elektroniky. Pro vytápění kabiny se používá běžná odporová vytápění nebo reverzní tepelná čerpadla, které je položkou příplatkové výbavy. Tepelné čerpadlo má vyšší účinnost a méně tak snižuje dojezd vozidla.

Tabulka 6: Výhody a nevýhody chlazení přímou expanzí

Výhody	Nevýhody
Vysoká účinnost + rovnoměrné chlazení	Absence ohřevu oběhem
Jednoduchost v porovnání s kapalinovým chl.	Vysoká cena
Vhodné pro PHEV a EV	

3. 2. 6 „PCM“ chlazení – chlazení změnou fáze

Technologie umožňující akumulovat energii ve formě tepla do akumulačních panelů. Využívá se zde principu tání a tuhnutí materiálu za konstantní teploty při které dochází k uvolnění nebo naopak akumulaci latentního tepla právě při změně skupenství, jak popisuje *Obrázek 17*. Tento princip se již řadu let používá ve stavebnictví k udržování konstantní teploty v místnostech při střídání dne a noci bez nutnosti místnost v noci vytápět, ve dne naopak vyhřívát.



Obrázek 17: Princip funkce „PCM“ [36]

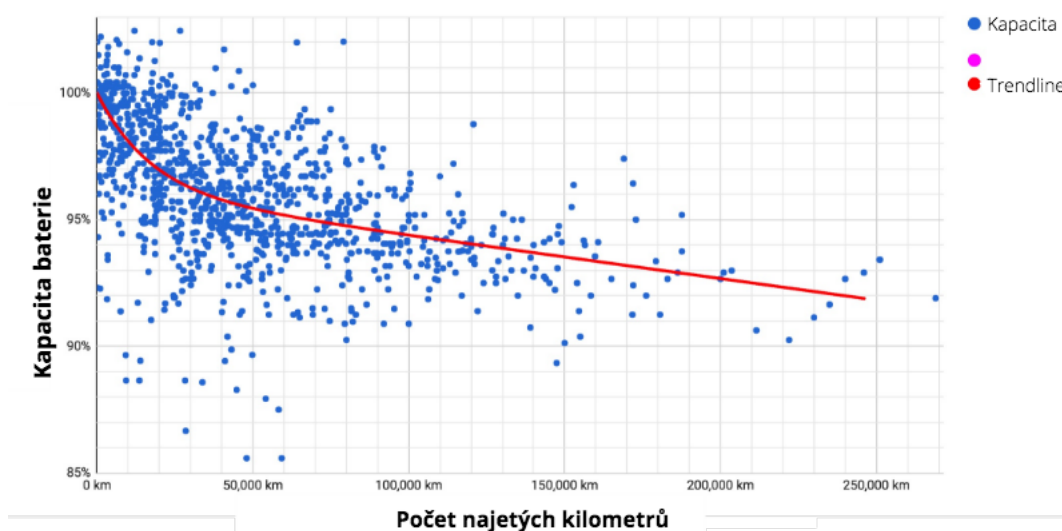
Technologii PCM je většinou nutné navázat na jednu z předešlých technologií jako podpůrný systém. Materiál zde slouží jako tepelný vodič a současně jako tlumič teplotních

rázů právě vlivem změny skupenství. Tato technologie se u sériových vozidel běžně neuplatňuje, avšak u závodních speciálů již byla aplikována. Komplikace představuje přímý kontakt materiálu s články baterie, který může vést k požáru, stejně tak jako změna objemu při změně fáze. Dle mého názoru se však v budoucnosti tato technologie uplatní i u sériových vozů. [29]

3.3 Degradace baterií

Moderní baterie, použité v EV a HEV společně s pokročilými monitorovacími systémy jejich stavu, začínají vykazovat vlastnosti vhodné pro jejich dlouhodobé využití. Minimální životnost baterií v automobilech je výrobci vyžadována alespoň na několik let, uživatelům řádově 10 let. Baterie však vlivem mnoha faktorů podléhá stárnutí a degradaci. Mezi nejvýznamnější faktory patří: provozní teplota článků baterií, teplota dlouhodobého skladování článků, cyklování – dobíjení z nízkého stavu nabití do 100 % a rychlost vybíjení a nabíjení. Degradace baterie se udává jako poměr stávající kapacity a původní kapacity v procentech. Koncem životnosti se u baterií považuje hranice 70–80 %.

Kapacitě baterií je přímo úměrný dojezd vozu. Pro každou technologii baterií se ideální styl použití mírně odlišuje, ale obecně se dá říci, že pro maximální kilometrový nájezd baterii je ideální: udržovat stav nabití mezi 20–80 % kapacity, udržování baterie při teplotě 15 °C – 30 °C, zabránit promrzání nebo naopak přehřívání baterie, pravidelné používání.



Obrázek 18: Degradace baterií vozů Tesla [37] [38]

Degradace baterií je velmi důležitým tématem masového rozvoje elektromobility, zda životnosti baterií nejsou na použití v EV příliš krátké. Na toto téma probíhá mnoho

výzkumů a monitorování stávajících elektromobilů v provozu. Zde uvedený příklad prezentuje výsledky průzkumu více než 900 majitelů automobilů Tesla Model S a Model X z celého světa. Ti pravidelně nahrávají své jízdy, společně s kapacitou baterie a průměrnou spotřebou elektrické energie. Z *Obrázek 18* je zřejmé, že degradace baterie na počátku probíhá výrazně rychleji, přibližný pokles o 5 % za prvních 50000 km, degradace zpomalí a pokračuje rychlostí 1 % za 50000 km. Tento trend je tedy velmi příznivý. [37] [38] [39]

3. 4 Vliv typu chlazení na degradaci baterie

Tabulka 7: Legenda, systém ohodnocení

Typ chladicího okruhu		Hodnocení	HEV	PHEV, EV
PC1	Pasivní chlazení vzduchem	Velmi dobré	< 0,5 %	<3,5 %
AC1	Aktivní chlazení vzduchem	Dobré	0,5 – 1,5 %	3,5 – 5,0 %
AC2	Aktivní chlazení kapalinou	Špatné	1,5 – 2 %	5,0 – 6,5 %
AC3	Aktivní chlazení přímou expanzí	Velmi špatné	2 < %	6,5 < %

Tabulka 8: Degradace baterií u konkrétních vozidel [38] [40]

	Výrobce	Model	Technologie akumulátorů	Původní kapacita [Ah]	Typ chlazení	Degradace baterie ¹⁾
HEV	Toyota	Prius (2010)	NiMH	6,5	PC1	0,3%
	Honda	CRZ (2011)	NiMH	5,75	PC1	0,7%
		Insight 2010	NiMH	5,75	PC1	0,1%
	Ford	Escape	NiMH	5,5	AC1	0,25%
	Lexus	RX400h	NiMH	6,5	PC1	1,1%
PHEV	Chevrolet	Volt	Li-ion	52	AC2	1,2%
	Toyota	Prius Plug-In (2013)	Li-ion	21,5	AC1	0,7%
EV	BMW	i3 (2014)	Li-ion	60	AC3	4,1%
	Chevrolet	Spark (2015)	Li-ion	52	AC2	3,6%
	Ford	Focus (2013)	Li-ion	75	AC2	5,3%
	Mercedes	Třída B (2015)	Li-ion	93	AC2	3,4%
	Mitsubishi	iMiev (2012)	Li-ion	50	AC1	7,4%
	Nissan	Leaf (2011)	Li-ion	66,2	PC1	6,1%
	Smart	Electric (2014)	Li-ion	52	AC2	3,8%
	Tesla	Model S, X	Li-ion	-	AC2	0,2 - 1%
	VW	E-Golf (2015)	Li-ion	75	PC1	4,3%

¹⁾ v %C / 10000 km

3. 4. 1 Shrnutí

Výsledkem rešeršní části bakalářské práce jsou tabulky s přehledy technologií článků použitých v baterii, počátečních kapacitách baterie, typu chlazení a degradace baterie v %/10000 km. Data byla zpracována z vládní laboratoře „Idaho National Laboratory“ [40]. Dat, které bylo možné o této problematice získat, nebylo dostatečné množství pro exaktní závěry, a proto výsledky hodnocení o vlivu chladicího systému na degradaci baterie musíme pokládat pouze za orientační. Vypočtené hodnoty degradace jsou vždy průměry výsledků získaných z nejméně 3 konkrétních automobilů. Testované HEV vozy byly měřeny po nájezdu 255 000 km. U PHEV a EV s výjimkou Tesly byly nájezdy výrazně nižší - v intervalu 30 000 – 60 000 km. Tyto dvě kategorie tedy nelze přímo porovnat, protože rychlost degradace při prvních 50 000 km je několikanásobně rychlejší než při delších nájezdech. Avšak data jsou dostatečná k určení míry degradace nadprůměrné nebo podprůměrné. Klasifikaci jsem udělil podle mých uvázení dle pravidel podle *Tabulka 7*. [38]. Z výsledků usuzuji následující:

- Pro HEV je pasivní chlazení dostatečné a ideální
- HEV i PHEV trpí na menší degradaci baterie, protože jejich stav nabití je řízen BMS a majitelé je používají častěji
- Pro PHEV a EV se nejlépe hodí aktivní kapalinové chlazení
- Chlazení vzduchem se pro EV nehodí, jak ukazují špatné výsledky Mitsubishi iMiev a Nissanu Leaf.

4. Praktická část – simulace chlazení baterie za jízdního cyklu v GT-SUITE

Úlohou této části bakalářské práce bylo seznámení se s programem GT-SUITE a poté v tomto programu navrhnout a simulovat teoretický, zjednodušený a aktivní kapalinový chladicí okruh včetně BTMS, navržený pro použití ve voze BMW i3 60 Ah. Model vozu a baterie byl poskytnut vedoucím práce. Cílem bylo navržení součástí chladicího okruhu, jejich přibližné parametry a také logiku jejich operací tak, aby docházelo k chlazení baterie, a ne jejímu přehřívání. Výsledný návrh byl spojen s modelem vozu a proběhla simulace chování při jízdních cyklech. Simulace a návrh byly prováděny za dozoru a asistence vedoucího bakalářské práce – Ing. Rastislava Tomana.

4.1 Návrh chladicího okruhu

V rešeršní části práce byl zjištěn doporučený pracovní rozsah pro Li-ion baterie (0 °C – 40 °C) a snahou bylo se udržet v tomto intervalu pro většinu teplotních podmínek okolí. V *Tabulka 9* jsou uvedeny parametry vozu, které byly použity při návrhu modelu baterie a vozidla.

Tabulka 9: Specifikace článků, baterie, vozu BMW i3 60 Ah [36] [41]

Specifikace článků		Specifikace vozu a baterie	
Výrobce	Samsung SDI	Rozměry vozu	3 999 × 1 775 × 1 578 mm
Typ / kapacita	Li-ion / 60 Ah	Hmotnost vozu	1280 kg
Jmenovité napětí	3,7 V	Max. výkon	125 kW
Rozměry	173 x 125 x 45 mm	Dojezd	190 km
Hmotnost	2 Kg	Napětí baterie	355 V
Nabíjecí teploty	0 °C ~ 60 °C	Celková hmot. baterie	235 kg
Vybíjecí teploty	-25 °C ~ 60 °C	Objem baterie	190 l

Pro návrh modelu chladicího okruhu byly použity komponenty a materiály z knihoven programu GT – SUITE, které byly modifikovány pro potřebu modelu, stejně tak jako matematické a fyzikální modely pro simulaci. Všechny parametry byly vloženy podle tutoriálů a instrukcí z nápovědy. Přestože jde o návrh jednoduchého modelu, stále

se jedná o komplexní problém a bylo nezbytné udělat na začátku několik závěrů, aby bylo možné model zjednodušit.

4. 1. 1 Předpoklady modelu

- Chladicí okruh nechladí elektromotor ani jeho elektroniku.
- Topení a pumpa chladicí kapaliny neodebírají proud z baterie.
- Baterie je izolovaná a odvádí tak veškeré teplo do chladicího okruhu.
- Tlak v soustavě na začátku simulace je roven atmosférickému tlaku – 1 bar.
- Chování baterie je popsáno pomocí „*lumped modelu*“ který matematicky zjednodušuje řešení teploty baterie jako jednoho hmotného bodu. To je pro mnoho aplikací včetně této, dostatečné.

4. 1. 2 Součásti chladicího okruhu

Součástí modelu chladicího systému byly navrženy parametry, aby se blížily reálným součástkám. To, zda jsou parametry předimenzované nebo naopak, by ukázala další důkladná optimalizace modelu, která již není součástí této práce.

Seznam součástí jejich parametrů:

- Pumpa – průtok až 22,5 l/min, objemový koef. - 0,8 a izoentropická účinnost - 0,8.
- Ventil 1, ventil 2 – řídí průtok vnitřní a vnější větve
- Chladič – objem chl. kap. - 1,6 l; objem vzduchu - 3,2 l; celkový objem - 4,6 l.
- Topení – objem 0,5 l; výkon 3 kW.
- Chladicí deska – plocha přestupu tepla z baterie 1,2 m². [41]
- Chladicí médium – 6,5 l, 50 % roztok ethylenglykolu, řezaného vodou (egl-5050)

Schémata chladicího okruhu a model vozu v GT-SUITE naleznete v *Příloze 2* na konci této práce.

4. 2 Nastavení parametrů okruhu pro simulaci

Chladicí okruh byl řízen pomocí sekvenční logické funkce a obsahuje 4 akční členy. Každý člen má přiděleny právě 2 funkční stavy. To, v jakém stavu se nachází, záleží na předchozím stavu a stávající splněné podmínce. V našem případě jsou mezní hodnoty podmínek stanoveny mezními teplotami. Parametry pro jednotlivé členy jsou vypsány v *Tabulka 10*.

Tabulka 10: Hodnoty logického řízení akčních členů

Akční člen	Logika akčních členů		Mezní hodnoty sekvenčního řízení	
	„0“	„1“	Dolní	Horní
Pumpa	Průtok 7,5 l/min	Průtok 22,5 l/min	28 °C	30 °C
Ventil 1	Zavřený	Otevřený	18 °C	20 °C
Ventil 2	Otevřený	Zavřený	18 °C	20 °C
Ohříváč	0 kW	3kW	12 °C	15 °C

Celkem bylo pro 2 jízdní cykly (NEDC, WLTC) provedeno 7 simulací za odlišných provozních podmínek.

Tabulka 11: Vstupní parametry pro simulace Jízda 1 – Jízda 8

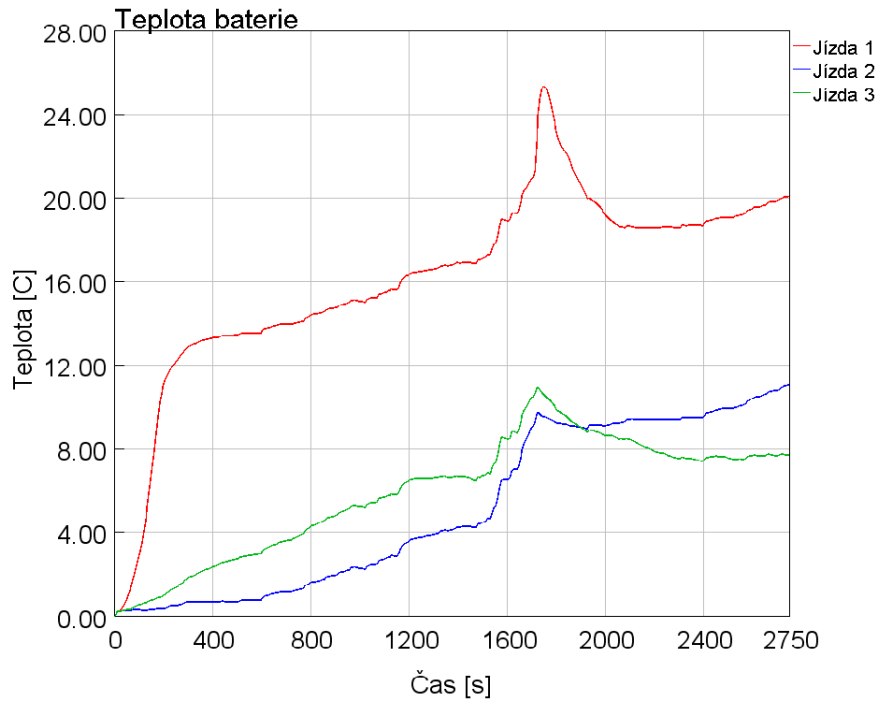
Simulace	Jízdní cyklus	Počet cyklů	Poč. teploty [°C] ¹⁾			Topení ²⁾	Ventily V1 a V2
			5	0	0		
Jízda 1	WLTC Class3	2	5	0	0	Aktivní	Aktivní
Jízda 2	WLTC Class3	3	5	0	0	Neaktivní	Aktivní
Jízda 3	WLTC Class3	3	5	0	0	Neaktivní	V1 – otevřený V2 – zavřený
Jízda 4	WLTC Class3	3	20	20	20	Aktivní	Aktivní
Jízda 5	NEDC	3	35	30	30	Aktivní	Aktivní
Jízda 6	NEDC	3	5	0	0	Aktivní	Aktivní
Jízda 7	NEDC	3	25	20	20	Aktivní	Aktivní
Jízda 8	HWY	3	35	35	40	Aktivní	Aktivní

¹⁾ Teplota okolí, teplota chladicího média, teplota baterie

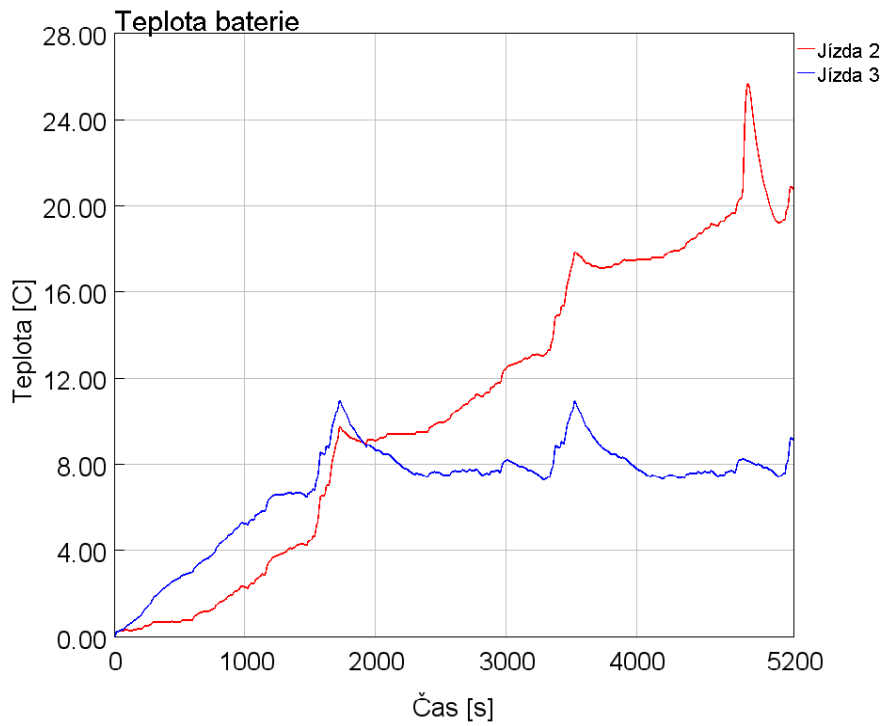
²⁾ Aktivní – logika topení je zapnuta
Neaktivní – topení je vypnuto

4.3 Výsledky

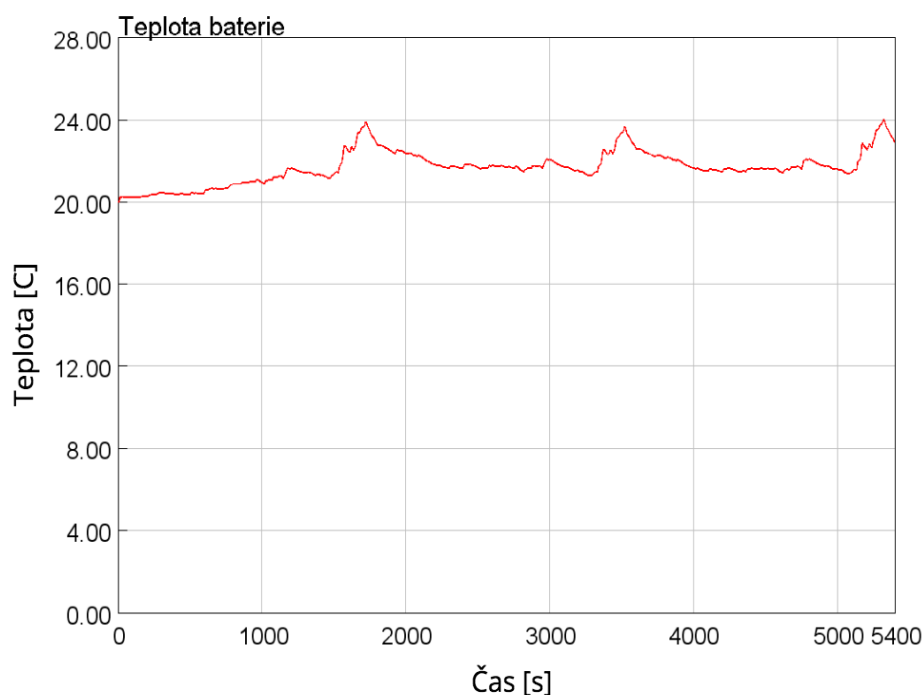
4.3.1 Výsledky simulace jízd s cykly WLTC – Class 3



Obrázek 19: Graf závislosti teploty baterie na čase pro WLTC, Jízda 1 - 3



Obrázek 20: Závislost teploty baterie na čase pro WLTC, Jízda 2 a 3



Obrázek 21: Závislost teploty baterie na čase pro WLTC, Jízda 4

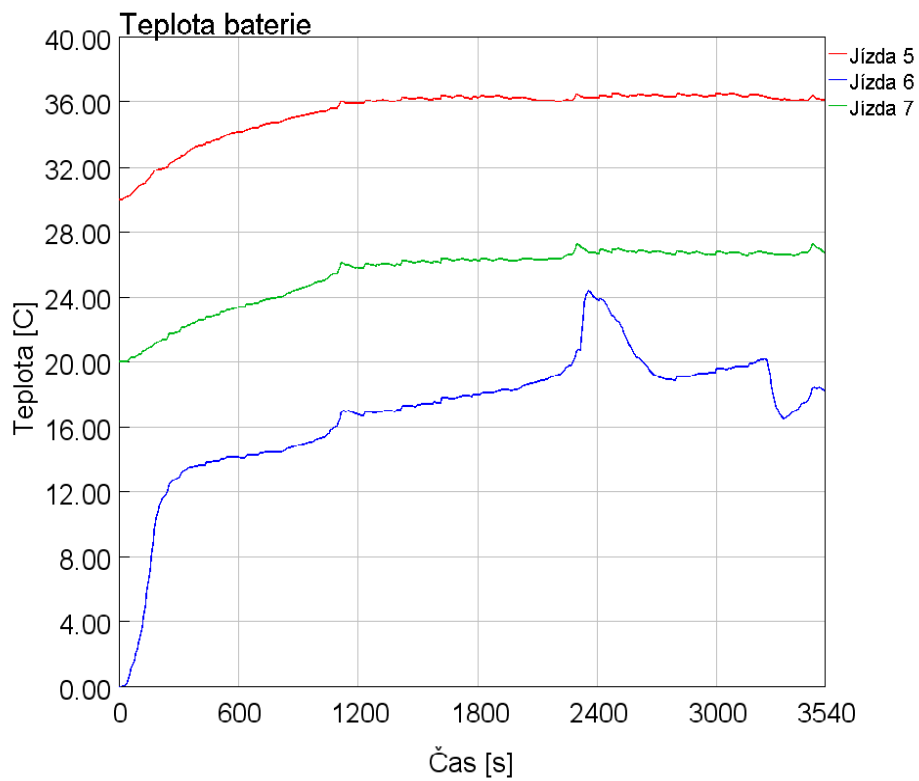
Poznámky k výsledkům:

Na *Obrázek 19* jsou výsledky srovnání jízd s totožnými počátečními teplotami ale rozdílnými nastaveními akčních členů v chladicím okruhu. Pro *jízdu 1* bylo aktivní topení, pro *jízdu 2 a 3* bylo topení vypnuto. Z výsledků je zřejmé, že topení výrazně urychluje ohřev baterie na ideální pracovní teplotu (15 °C–35 °C). Časová osa na *Obrázek 19* byla zkrácena kvůli krátkodobému problému s konvergencí řešení v druhé polovině simulace *jízdy 1*.

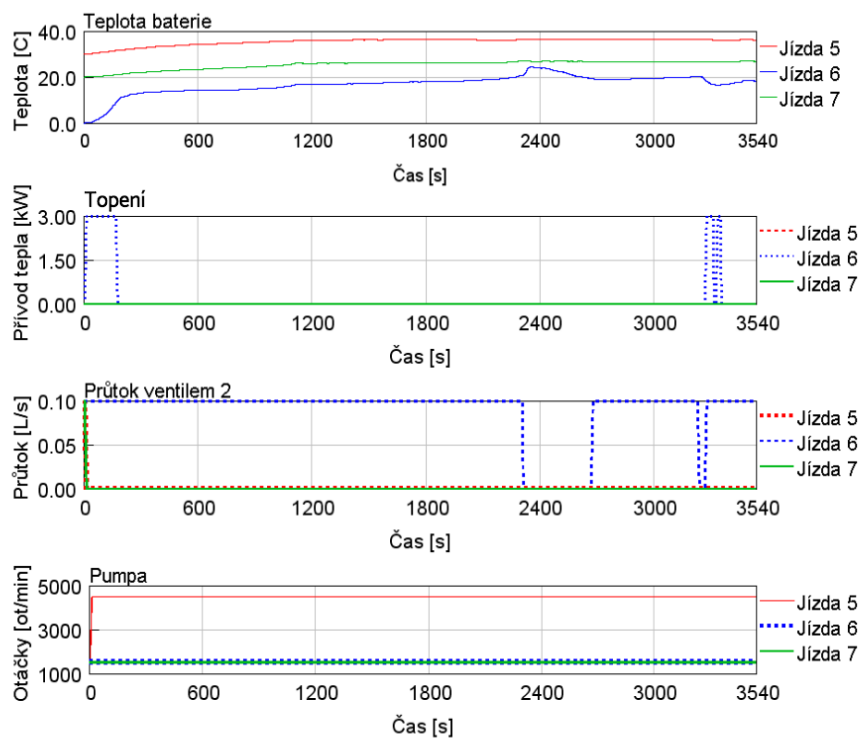
Na *Obrázek 20* jsou porovnány *jízda 2 a 3* v celé délce, ze kterých můžeme pozorovat rozdíl mezi v chlazení mezi „malým“ okruhem bez chladiče a „velkým“ okruhem s chladičem. Na počátku probíhá ohřev baterie rychleji ve „velkém“ okruhu, protože teplota okolí je vyšší než teplota okruhu. Od času přibližně 1900 sekund již „malý“ okruh vykazuje lepší vlastnosti, protože je schopný ohřívat baterii až do intervalu ideální pracovní teploty.

Na *Obrázek 21* můžeme vidět, že při počáteční teplotě 20 °C, se teplota baterie pohybuje v rozmezí 20 °C–24 °C.

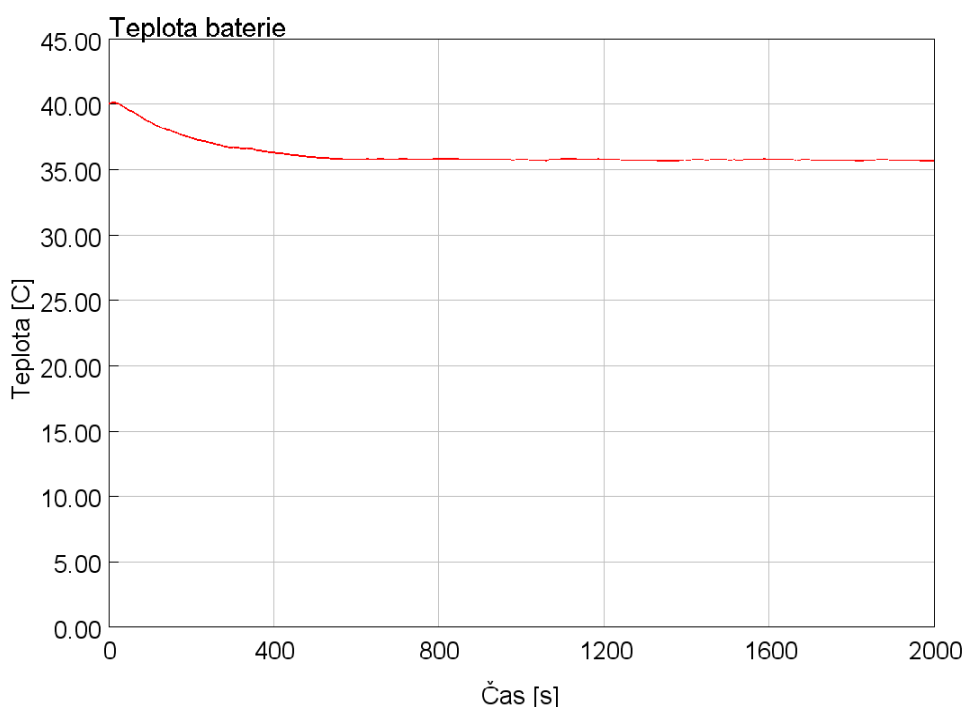
4. 3. 2 Výsledky simulace jízd s cykly NEDC a HWY



Obrázek 22: Závislost teploty baterie na čase pro NEDC, Jízda 5-7



Obrázek 23: Reakce aktivních částí systému při NEDC, Jízda 5-7



Obrázek 24: Závislost teploty baterie na čase pro HWY cyklus, Jízda 8

Poznámky k výsledkům:

Na *Obrázek 22* je zobrazeno porovnání jízd s rozdílnými počátečními teplotami a všemi aktivními členy. *Jízda 5* byla simulována s vysokými počátečními teplotami - 30 °C a teplotou okolí 35 °C. I za těchto podmínek se teplota baterie pohybuje v rozumných mezích hodnot. *Jízda 6* byla naopak simulována pro nízké počáteční teploty - 0 °C a teploty okolí - 5 °C. Je zde zřejmý vliv zapnutí topení na počátku a také zavření „malého“ a otevření „velkého“ okruhu v časech přibližně 2300 a 3250 sekund. *Jízda 7* byla simulována pro počáteční i okolní teploty - 20 °C.

Na *Obrázek 23* jsou zobrazeny zásahy akčních členů do řízení pro *Jízdy 5, 6, 7*. Hodnoty zásahu topení pro *Jízdu 5 a 7* jsou totožné a jejich křivky se překrývají.

Na *Obrázek 24* je zobrazen průběh teploty pro simulaci jízdy podle protokolu HWY – dálniční provoz. *Jízda 8* byla simulována při počátečních teplotách - 40 °C a teplotě okolí 35 °C.

5. Závěr

V první části práce byly stručně popsány důvody, proč je chlazení baterií důležité nejen v osobních automobilech. V první části rešerše byl vypracován přehled běžných typů článků baterií dle použité chemické technologie, jejich geometrického uspořádání a zda jsou nebo nejsou vhodné pro použití v HEV a EV se seznamem použití v konkrétních vozidlech na trhu. V druhé části rešerše je vypracovááno rozdělení chladicích okruhů systémů řízení teploty baterií ve vozech a byl vypracován přehled jejich použití a předpokládaným vlivem na degradaci baterií u konkrétních vozů.

Třetí a závěrečná část obsahuje návrh teoretického chladicího okruhu baterie a jeho logiku řízení pro vozidlo BMW i3 s 60Ah za použití programu GT-SUITE v2017. Výsledky návrhu jsou grafy tepelného chování baterie při testovacích jízdách cyklech *NEDC*, *WLTC Class3* a *HWY*. Součástí výsledků této části práce je i zvolená logika akčních prvků. Data z této práce by mohla být použita jako podklady pro návrh optimalizovaného modelu reálného chladicího okruhu a jeho následné realizaci. Výsledný program naleznete přiložený na CD na vnitřní straně desek této práce.

Při optimalizaci modelu chlazení byly provedeny zjednodušení a závěry konzultované s vedoucím práce tak, aby simulace byla dostatečně přesná pro účely této práce. Zjednodušení a závěry v některých případech nemusejí zcela odpovídat skutečnosti. Mé návrhy pro další zpřesnění výsledků simulace modelu jsou např.: řízení zásahů akčních členů PID regulátory místo logického řízení, napájení topení a pumpy z baterie a dále zkoumání příčin problémů s konvergencí v druhé části simulace *Jizdy 1*. Vše uvedené přesahuje zadání této práce a mohlo by být předmětem návrhu a řešení optimalizace v navazující diplomové práci.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Závislost výkonu baterie na teplotě [2].....	5
Obrázek 2: Životnost Li-ion baterií na teplotě prostředí [9].....	8
Obrázek 3: zjednodušené schéma Li-ion a pevné baterie [13].....	10
Obrázek 4: schéma Li-ion cylindrického článku [13].....	12
Obrázek 5: Uspořádání článků v modulu s aktivním chlazením vozu Tesla [23]...	13
Obrázek 6: Schéma prizmatického článku [21].....	14
Obrázek 7: Článek „pouch cell“ [21].....	15
Obrázek 8: „Nafouknutý“ článek „pouch cell“ [26].....	15
Obrázek 9: Schéma pasivního chlazení vzduchem (28)	19
Obrázek 10: Schéma aktivního chlazení vzduchem [28].....	20
Obrázek 11: Chlazení hybridního pohonu – Ford Escape Hybrid (r.v. 2008) [32].	20
Obrázek 12: Schéma aktivního chlazení kapalinou [29].....	22
Obrázek 13: Aktivní kapalinového chlazení – Tesla Model S 85D [34]	23
Obrázek 14: Schéma chladících okruhů hybridního vozu VW Golf GTE [35]	25
Obrázek 15: Schéma chladících okruhu přímou expanzí [29]	26
Obrázek 16: BMW i3 [36].....	26
Obrázek 17: Princip funkce „PCM“ [36]	27
Obrázek 18: Degradace baterií vozů Tesla [37] [38].....	28
Obrázek 19: Graf závislosti teploty baterie na čase pro WLTC, Jízda 1 - 3	34
Obrázek 20: Závislost teploty baterie na čase pro WLTC, Jízda 2 a 3	34
Obrázek 21: Závislost teploty baterie na čase pro WLTC, Jízda 4	35
Obrázek 22: Závislost teploty baterie na čase pro NEDC, Jízda 5-7.....	36
Obrázek 23: Reakce aktivních částí systému při NEDC, Jízda 5-7.....	36
Obrázek 24: Závislost teploty baterie na čase pro HWY cyklus, Jízda 8	37

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled technologií baterií používaných v HEV a EV [16] [17] [18]...	11
Tabulka 2: Kritické a ideální meze teplot provozu [4] [19] [20].....	11
Tabulka 3: Výhody a nevýhody pasivního chlazení vzduchem	19
Tabulka 4: Výhody a nevýhody aktivního chlazení vzduchem.....	21
Tabulka 5: Výhody a nevýhody aktivního chlazení kapalinou	26
Tabulka 6: Výhody a nevýhody chlazení přímou expanzí.....	27
Tabulka 7: Legenda, systém ohodnocení	29
Tabulka 8: Degradace baterií u konkrétních vozidel [38] [40]	29
Tabulka 9: Specifikace článků, baterie, vozu BMW i3 60 Ah [36] [41].....	31
Tabulka 10: Hodnoty logického řízení akčních členů	33
Tabulka 11: Vstupní parametry pro simulace Jízda 1 – Jízda 8	33

Seznam příloh

Příloha 1 – Schéma BTMS Tesla 85D

Příloha 2 – Schéma modelu v GT-SUITE

Výsledný program naleznete přiložený na CD na vnitřní straně desek této práce.

Použité formulace a zkratky

Battery pack – v této práci používám jen pojem – baterie

BMS – „Battery management systém“ - systém řízení baterie

BTMS – „Bettery thermal management systém“ - systém řízení tepla baterie

EV – elektrické vozidlo

HEV – hybridní elektrické vozidlo

HWY – z angl. „highway“ – dálniční cyklus

NEDC – „New European Driving Cycle“

PCM – „Phase change materiál“ – Materiál se změnou fáze

PHEV – plug-in hybridní elektrické vozidlo

r. v. – rok výroby

„Solid state“ – Baterie s pevným elektrolytem

WLTC – „Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure Class 3 Cycle“

Citovaná literatura

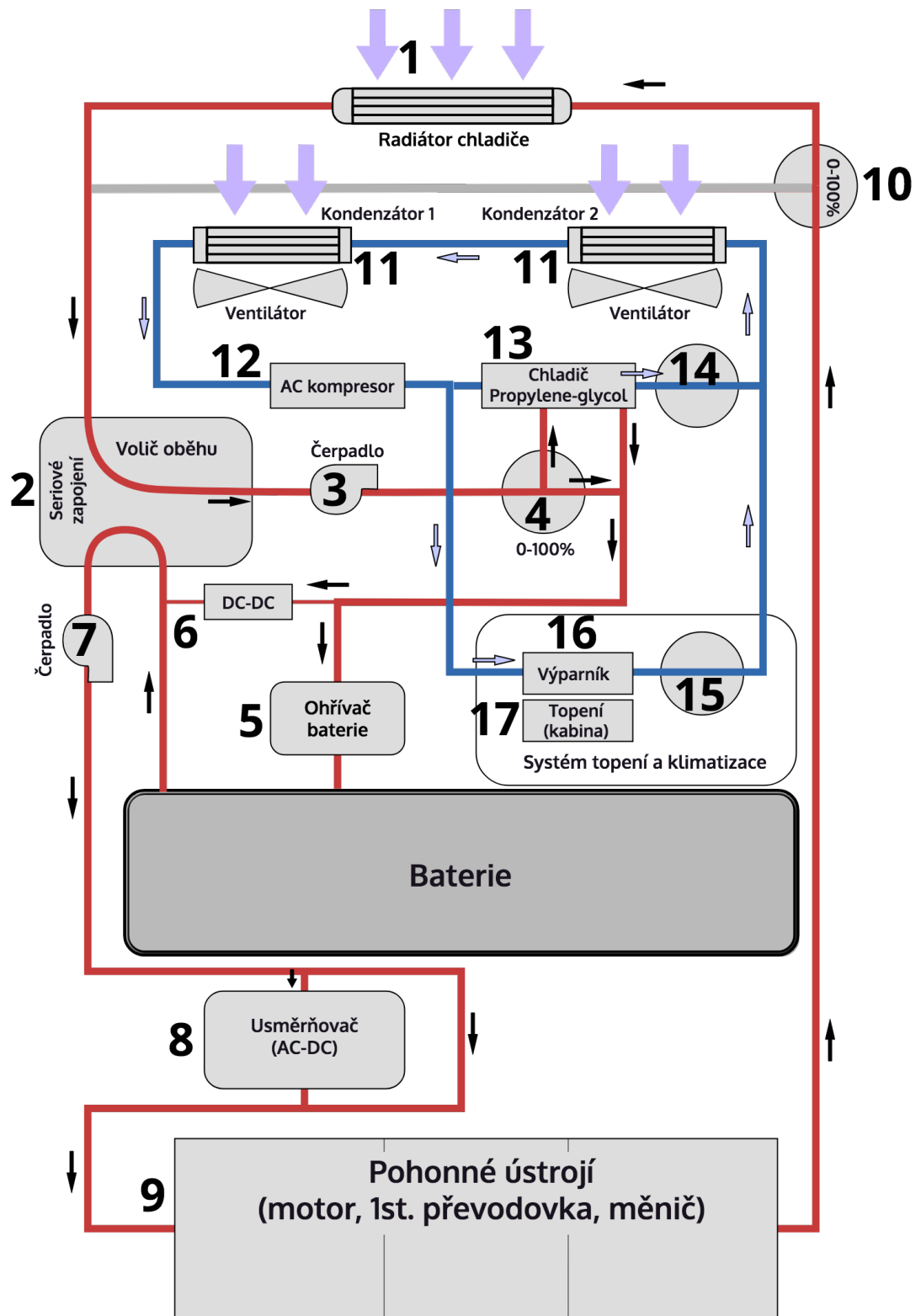
- [1] Vlahinos, Andreas & Kelly, Kenneth & Rugh, John & Pesaran, Ahmad. (0002). *Improving Battery Thermal Management Using Design for Six Sigma Process*
- [2] Matthe, R., Turner, L. & Mettlach, H., 2011. VOLTEC Battery System for Electric Vehicle with Extended Range. *SAE International Journal of Engines*, 4(1), pp. 1944-1962.
- [3] Porsche: *Milestones in hybrid technology*. *porsche.com*. [Online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.porsche.com/specials/en/international/mission-report/~report~/milestones-in-hybrid-technology/international~en~mission-report-technologyandinnovation-e-performance/>
- [4] Battery University: *What's the best battery?* [Online]. [cit. 2018-20-03]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery
- [5] Wikipedia: *Olověný akumulátor* [Online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Olověný_akumulátor
- [6] EV WORLD: *Givint EVs the SAFT*. [Online]. [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <http://evworld.com/article.cfm?storyid=663>.
- [7] Wikipedia: *Nikl-kadmiový akumulátor* [Online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-kadmiový_akumulátor
- [8] Wikipedia: *Nikl-metal hybridový akumulátor* [Online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-metal_hybridový_akumulátor
- [9] Matthe, Roland & Eberle, Ulrich. (2014). *The Voltec System: Energy Storage and Electric Propulsion. Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications*. 151-176.
- [10] Battery University: *Is Lithium-ion the ideal battery* [Online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery
- [11] Wikipedia: *Lithium-iontový akumulátor* [Online] [cit. 2018-04-02]. https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-iontový_akumulátor

- [12] Wikipedia: Lithium-polymerový akumulátor [Online]. [cit. 2018-04-03].
https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-polymerový_akumulátor
- [13] WANG, Brian. Next big future: *Toyota plans to leapfrog Tesla* [Online].
[cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.nextbigfuture.com/2017/08/toyota-plans-to-leapfrog-tesla-electric-cars-by-2022-with-fast-charging-solid-state-batteries.html>
- [14] Wikipedia: *Solid state battery*[Online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Solid-state_battery
- [15] Battery University: *Rechargeable batteries*. [Online]. [cit 2018-04-10]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_/rechargeable_batteries
- [16] Kwo Young, Caisheng Wang, Le Yi Wang, and Kai Strunz. *Electric Vehicle Battery Technologies*. 2012
- [17] Battery University. *Electric Vehicles*. [Online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle_ev
- [18] C Iclodean et al 2017. *Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles*. IOP Publishing Ltd. Mater. Sci. Eng. 252 012058
- [19] Battery University: *Discharging at high and low temperatures*. [Online].
[cit. 2018-04-07]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/discharging_at_high_and_low_temperatures
- [20] OGAWA, Mitsuyasu. *All-Solid-State Lithium Batteries with Wide Operating Temperature Range*. 2012.
- [21] Battery University: *Types of battery cells* [Online]. [cit. 15. Březen 2018].
Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells
- [22] Hanley, Steve. Clean Technica: *New video takes you inside a Tesla 2170 battery*. [Online]. [cit. 2018-04-3]. Dostupné z: <https://www.cleantechnica.com/2018/02/14/new-video-takes-inside-tesla-2170-battery-cell/>
- [23] Synergy Files: *Tesla battery pack optimization*. [Online]. [cit. 2018-04-20].
Dostupné z: <http://synergyfiles.com/2016/03/tesla-battery-pack-optimization/>

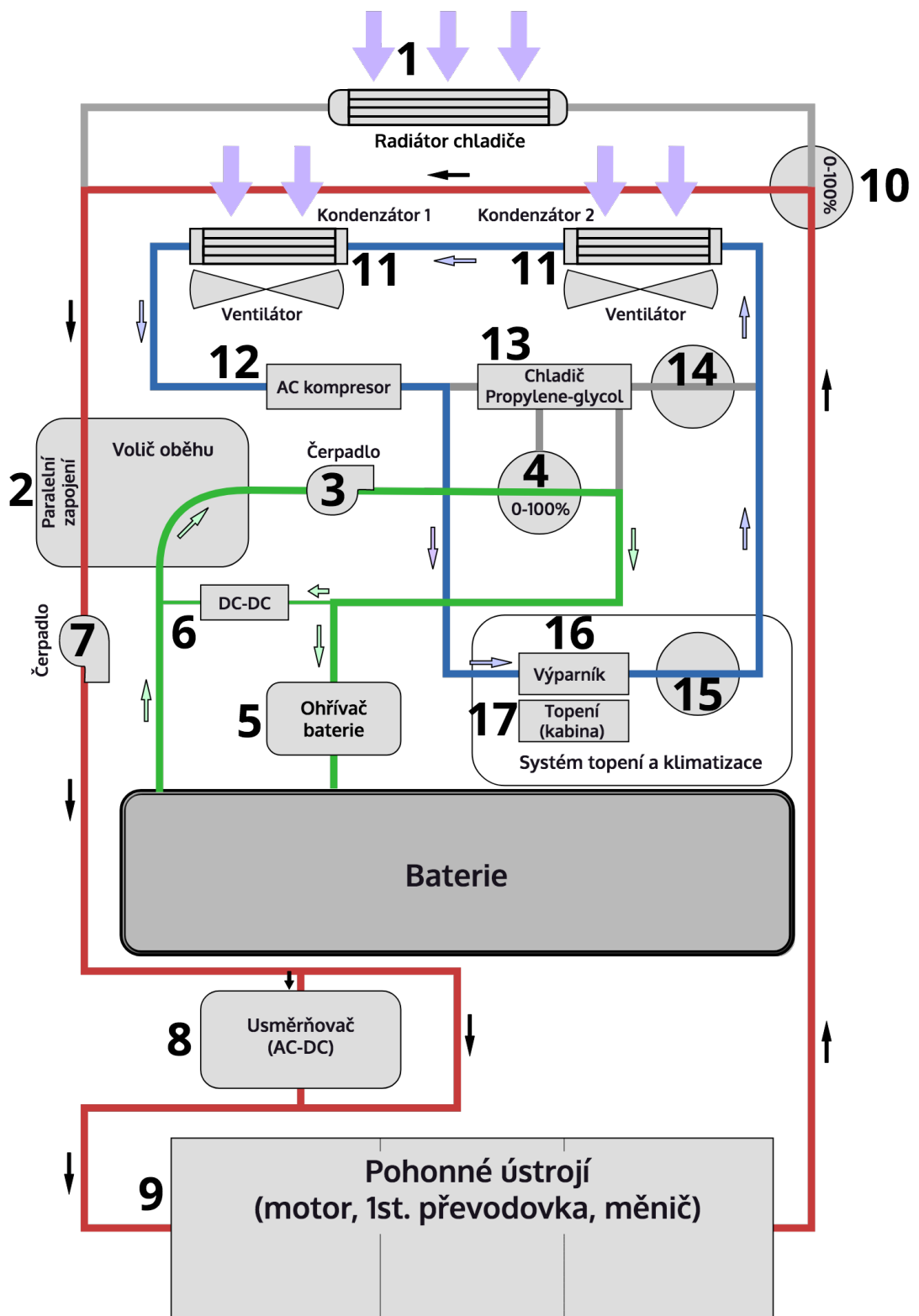
- [24] Panasonic Corporation: *Toyota and Panasonic to Start Feasibility Study of Joint Automotive Prismatic Battery Business*. [Online]. [cit.2018-04-03]. Dostupné z: <https://news.panasonic.com/global/press/data/2017/12/en171213-3/en171213-3.html>
- [25] Williams: *From Formula 1 to Formula E and beyond – a cycle of williams battery development*. [Online]. [cit: 2018-04-04]. Dostupné z: <http://past.cenex-lcv.co.uk/2015/assets/downloads/lcv2015-presentations/seminar-dome-pm-svt/ian-cluett.pdf>
- [26] Qnovo: *All you wanted to know about batteries but were afraid to ask* [Online]. [cit.2018-04-18]. Dostupné z: <http://qnovo.blogspot.cz/2014/10/23.html>
- [27] Meteobox: *Počasi statistiky Los Angeles, Kalifornie, USA*. [Online]. [cit. 2018-05-11]. <https://meteobox.cz/kalifornie-usa/los-angeles/statistiky/>
- [28] Pesaran, Ahmad. (2001). *Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions*
- [29] Jiling, Li a Zhen, Zhu. *Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles*. Göteborg: 2014. 1652-8557.
- [30] Kurzycz: *Počasi*. [Online]. [cit. 2018-04]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/pocasi-v-norsku/oslo-1/statistiky/>
- [31] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Vyd. 3. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004. 80-01-02933-6.
- [32] DynSAN. *Hybrid Vehicle Powerplant Cooling*. [Online] [cit. 2018-05-05] <http://www.dynsan.com/gpage2.html>
- [33] Nissan newsroom Europe: *e-NV200: Electric Motor and Battery*. [Online]. [cit. 2018-05-29]. Dostupné z: <https://newsroom.nissan-europe.com/eu/en-gb/media/pressreleases/120591>.
- [34] Tesla Motors Club: *Tesla Thermal Management System - explanation*. [Online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://teslamotorsclub.com/tmc/threads/tesla-thermal-management-system-explanation.88055/>

- [35] Green Car Congress: *Volkswagen Group's MQB plug-in hybrid powertrain*. [Online]. [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.greencarcongress.com/2014/04/20140403-mqbphev.html>
- [36] Autoblog: *2015 BMW i3*. [Online]. [cit. 2018-06-04]. Dostupné z: <https://www.autoblog.com/buy/2015-BMW-i3/?guccounter=1>
- [37] D'Angelo, Matt. Teslarati: *Tesla battery predicted to have 80% capacity after 840,000 km (521,000 mi)*. [Online]. [cit. 2018-06-01]. Dostupné z: <https://www.teslarati.com/tesla-battery-life-80-percent-capacity-840km-1-million-km/>
- [38] Google Documents: *MaxRange Tesla Battery Survey*. [Online]. [cit. 2018-06-01]. Dostupné z: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/t024bMoRiDPIDialGnuKPsg/edit#gid=154312675>
- [39] Xing, Jin and Vora, Ashish P. *Comparison of Li-Ion Battery Degradation Models for System Design and Control Algorithm Development*. 2017. DOI: 10.23919.
- [40] Idaho National Laboratory: *Library – By Vehicle*. [Online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://avt.inl.gov/content/pubs-vehicles>
- [41] InsideEVs: *BMW and LG Chem Trump Tesla in Battery Thermal Management* [Online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <https://insideevs.com/bmw-lg-chem-trump-tesla-battery-thermal-management-bower/>

Příloha 1 – Schéma BTMS Tesla 85D

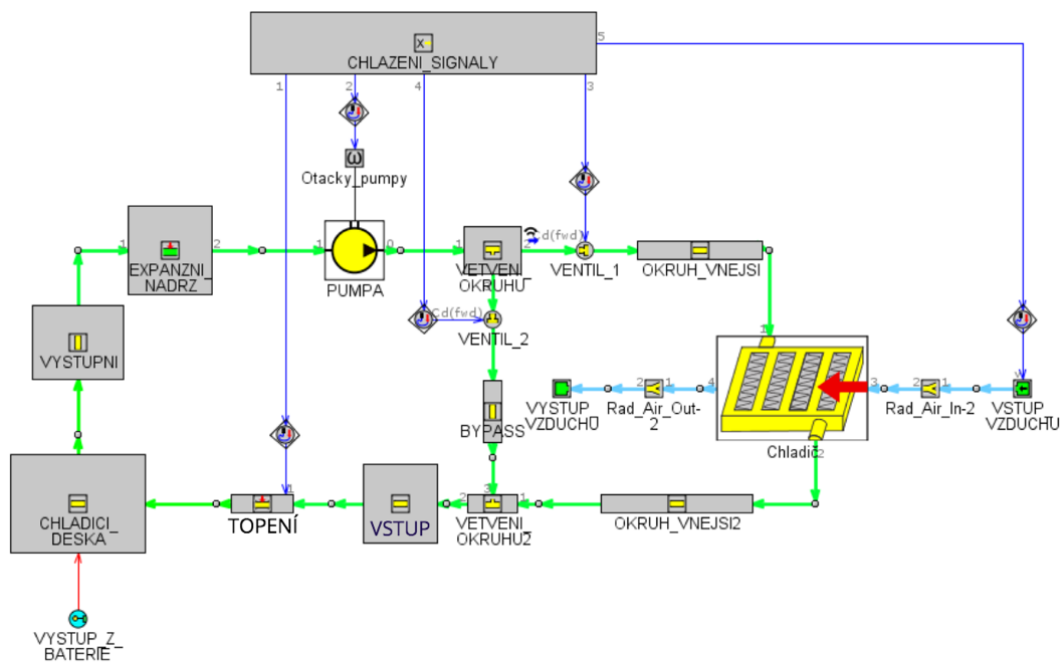


Podrobné schéma (2) aktivního kapalinového chlazení – Tesla Model S 85D (34)

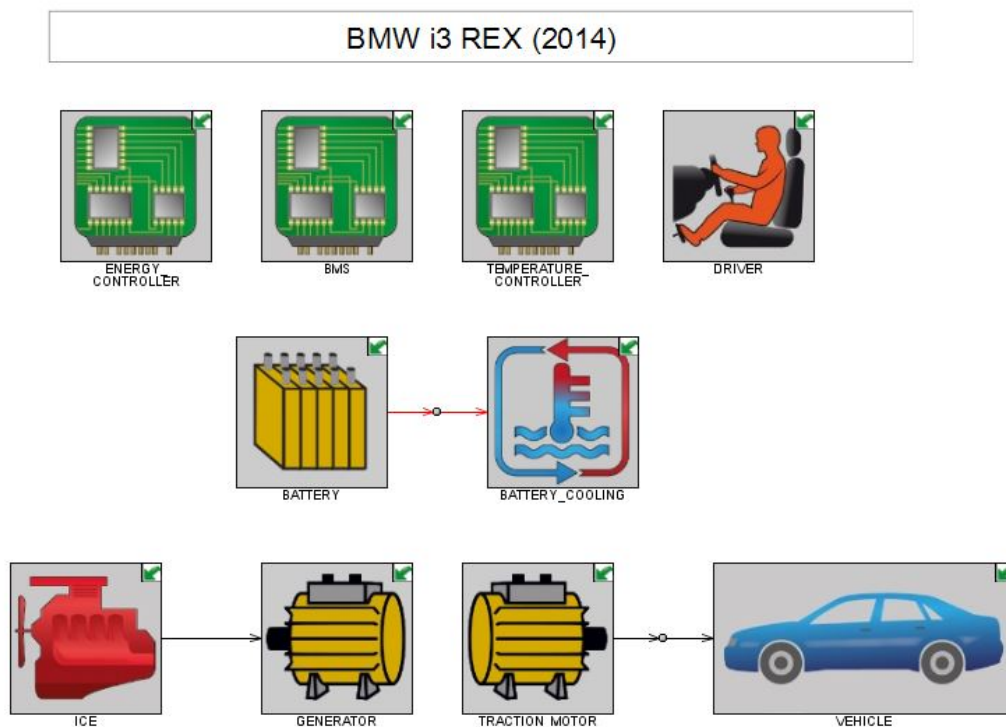


Podrobné schéma (3) aktivního kapalinového chlazení – Tesla Model S 85D (34)

Příloha 2 – Schéma modelu v GT-SUITE



Navržený model chladicího okruhu v programu GT-SUITE



Model vozidla BMW i3 v GT-SUITE