



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

POŽÁRY BATERIÍ V ELEKTROMOBILECH

FIRE OF BATTERIES IN ELECTRIC VEHICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Štěpán James Blažek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Bc. Lukáš Preisler

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Štěpán James Blažek**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Bc. Lukáš Preisler**
Akademický rok: 2023/24

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

Požáry baterií v elektromobilech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S rostoucím počtem elektromobilů na silnicích se zvyšuje i riziko jejich požárů. Práce se zaměřuje na příčiny vzniku a důsledky požárů baterií, které jsou použité v elektromobilech. Baterie jsou vyrobeny z různých materiálů, včetně těch toxických. V určitém stavu může dojít v baterii k jevu thermal runaway, který způsobuje nekontrolovaný požár, který znečišťuje ovzduší i hasební vodu při hašení.

Cíle bakalářské práce:

Popsat bateriové články využívané v elektromobilech, jejich princip, druhy a používané materiály. Provést rešerši na vznik jevu thermal runaway v bateriových člancích a v elektromobilech. Zhodnotit bezpečnost elektromobilu a srovnat elektromobil s automobilem s konvenčním spalovacím motorem mj. na základě skutečných požárů v praxi.

Seznam doporučené literatury:

KORTHAUER, Reiner a Michael WUEST. Lithium-ion batteries: basics and applications. Berlin: Springer, 2018, xx, 413 stran : ilustrace (některé barevné), grafy. ISBN 978-3-662-53069-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato BP se zabývá příčinami vzniku a tvorby požárů v bateriích elektromobilů. První část shrnuje teorii týkající se druhů baterií, používaných materiálů a provádí rešerši jevu, který je znám pod názvem Thermal runaway. Druhá část práce popisuje hoření elektromobilů se základní kategorizací vzniku požáru u elektromobilu a jevy, které je doprovázejí. Statistické porovnání aktuálního i budoucího vývoje počtu požárů elektricky poháněných vozidel na území ČR ve srovnání s konvenčním spalovacím motorem, analýza dat a doporučení jsou shrnuty v poslední části bakalářské práce. Z uvedené statistiky vyplývá, že k hoření elektromobilu dochází s nižší pravděpodobností, ovšem je doprovázeno vylučováním nebezpečných plynů a tvoří tak významnou výzvu z hlediska hašení požáru.

Klíčová slova

Li-ion baterie, Thermal runaway, požár, hašení baterií, elektromobilita

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the causes and formation of fires in electric vehicle batteries. The first part summarizes the theory related to types of batteries, used materials, and reviews the phenomenon known as Thermal runaway. The second part of the thesis describes the burning of electric vehicles, providing basic categorization of fire occurrence in electric vehicles and the phenomena accompanying them. The statistical comparison of the current and future development of the number of fires in electrically powered vehicles in the Czech Republic compared to conventional combustion engines, data analysis, and recommendations are summarized in the final part of the bachelor thesis. From the given statistics, it is evident that an electric vehicle is less likely to catch fire, however, it is accompanied by the release of hazardous gases, creating a significant challenge in terms of fire extinguishing.

Key words

Li-ion battery, Thermal runaway, fire, extinguishing batteries, electromobility

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BLAŽEK, Štěpán James. Požáry baterií v elektromobilech [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157449>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Lukáš Preisler.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Požáry baterií v elektromobilech vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Bc. Lukáši Preislerovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	13
1 Bateriaové články	14
1.1 Druhy baterií.....	14
1.1.1 Nikl-kadmiové baterie	14
1.1.2 Nikl-metal hydridové baterie.....	14
1.1.3 Li-ion baterie	15
2 Princip fungování Li-ion baterií	16
2.1 Elektrody	17
2.1.1 Katodový materiál NCA.....	17
2.1.2 Katodový materiál NMC	17
2.1.3 Katodový materiál LFP	18
2.2 Elektrolyt	18
2.3 Chemické reakce článku.....	19
2.4 Proces nabíjení a vybíjení.....	20
3 Thermal runaway	22
3.1 Příčiny vzniku.....	22
3.1.1 Vnitřní zkrat.....	23
3.1.2 Vnější zkrat.....	23
3.1.3 Přebíjení.....	24
3.1.4 Přílišné vybíjení.....	24
3.2 Hašení bateriových článků.....	24
3.3 Preventivní opatření.....	25
3.3.1 Thermal Management Systems	25
3.3.2 Battery Management Systems	25
3.3.3 Cell-Level Mechanisms	25
4 Požáry elektromobilů.....	27
4.1 Rizika vzniku požáru	27
4.1.1 Teplotní vlivy	27
4.1.2 Mechanické vlivy	27
4.1.3 Přetěžování elektrického systému	28
4.2 Dosavadní případy hoření.....	28
4.2.1 Samovznícení	28
4.2.2 Vzplanutí nabíječícího se EV	29
4.2.3 Požár po nárazu	29
4.2.4 Znovuzapálení	29
4.2.5 Jiné externí faktory	29
4.3 Likvidace požárů	29
4.3.1 Bezpečnost.....	30
4.3.2 Porovnání se spalovacím motorem.....	30
4.3.3 Zhodnocení rizik požárů u elektromobilů	30

5	Požáry elektromobilů v České republice	31
5.1	Data pojišťoven	31
5.2	Data hasičů	31
5.3	Švédská studie	32
5.4	Předpokládaný vývoj na území České republiky	33
ZÁVĚR.....		35
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....		37
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		40

ÚVOD

Elektromobilita je v současné době předmětem mnoha diskuzí ať už mezi výrobci automobilů, vládami jednotlivých zemí nebo širší veřejností. Evropská unie se významně angažuje v roli podpůrce elektrických vozidel, které nabízejí řadu výhod, jako tišší chod, sníženou míru znečišťování okolního prostředí a možnosti využití energie z obnovitelných zdrojů.

Dnes jsou na silnicích miliardy vozidel se spalovacím motorem, které jsou zodpovědné za spotřebu značného množství světové ropy a celkové vyprodukované energie. Rostoucí světová populace a důsledky globálního oteplování přispívají k větší potřebě ekologicky odpovědných dopravních řešení. To spolu s pokrokem ve výrobě Li-ion baterií umožňuje větší počet elektromobilů na silnicích.

Li-ion baterie jsou považovány za významnou technologii, která otevře cestu pro elektromobily a nakonec nahradí spalovací motor jako dominantní pohonnou jednotku v automobilech.

Hořlavost mechanismů pro přenos energie je přímo spojena s jejich palivem. Tradiční automobily často používají paliva, jako je benzín, nafta a zemní plyn. Pokud toto palivo není řádně skladováno a manipulováno, může explodovat. Většina dnešních elektromobilů je poháněna Li-ion bateriemi, které fungují na stejném principu. Některé charakteristiky hořící Li-ion baterie zahrnují tepelný únik a uvolňování nebezpečných plynů. To naznačuje, že riziko požáru elektrických vozidel je sice odlišné od požáru konvenčních vozidel, ale nemusí být vyšší. Thermal runaway Li-ion baterie je hlavní příčinou požárů elektromobilů.

S očekáváním vzrůstajícího trendu vývoje elektromobility a stále většího nasazení elektricky poháněných vozidel do běžného provozu se objevují další otázky související s bezpečností jejich provozu a výzvy spojené s požáry a likvidací ohořelých automobilů a použité hasební vody.

Tato bakalářská práce se v první části zabývá popisem bateriových článků, včetně jejich typů, principu fungování a stručného historického vývoje. Zmíněno je i jejich využití v určitých typech elektromobilů. Dále jsou v ní uvedeny elektrochemické reakce, které probíhají během procesů nabíjení a vybíjení.

Součástí práce je rovněž detailní popis jevu známého jako Thermal runaway, jehož výskyt je pevně spjat s požáry elektromobilů, včetně příčin jeho vzniku a preventivních opatření zabráňujících jeho genezi. Popsány jsou také vhodné hasicí prostředky a vlastnosti, které by ideální hasicí látka měla obsahovat, aby se docílilo co nejvyšší účinnosti.

Ve druhé části práce je analyzováno hoření elektromobilů z pohledu celku, nejen baterie, se zaměřením na vlivy, které k němu vedly a vnější projevy požárů. Práce také obsahuje zamyšlení nad zmírněním environmentálních dopadů a problémy s likvidací ohořelého vozidla a znečištěné hasicí vody.

Poslední kapitola se zaměřuje na statistiky požárů spojené s elektrickými vozidly na území České republiky a jejich srovnání se situací ve Švédsku, které je jedním z lídrů v této oblasti. Na základě dat z Ministerstva průmyslu a obchodu se v této kapitole odhaduje budoucí počet elektrovozidel v provozu v ČR a pravděpodobný výskyt jejich požárů v následujících dvaceti letech.

1 Bateriové články

Nejprve je důležité definovat, co vůbec baterie představuje. Obecně se jedná o soubor elektrochemických článků, což jsou zařízení, která transformují chemickou energii na elektrickou. Tato energie musí být dodávána nepřerušovaně a stabilně. Samotná baterie poté může být chápána jako sestava zmíněných článků, uspořádaných sériově nebo paralelně, tak aby bylo napětí zvýšeno na požadovanou úroveň [1].

V rámci elektrochemických článků se rozlišuje mezi primárními nebo sekundárními články. Zatímco sekundární článek neboli akumulátor, může být opakovaně nabíjen a vybíjen, primární článek umí být pouze vybíjen. Je tedy určen k jednorázovému použití. Pro naše využití, tak není vhodný a budeme se zaměřovat na články sekundární. Nabíjení sekundárního článku je uskutečněno změnou směru proudu, což indukuje reverzní chemickou reakci. Volba konkrétního článku je poté závislá na jeho aplikaci. Důraz může být kladen na životnost, rozměry, cenu nebo kapacitu.

Každý elektrochemický článek se skládá z kladné a záporné elektrody, které jsou odděleny porézním polymerem, separátorem, impregnovaným elektrolytem. Separátor zajišťuje izolaci elektrod s odlišnými potenciály, zatímco elektrolyt umožňuje průchod iontů mezi nimi. Hovoříme-li o sekundárních článcích je vhodné odkazovat se pouze na kladně nebo záporně nabitě elektrody bez specifikace probíhající reakce. Vzhledem k reverzní povaze procesu při vybíjení, kde dochází k oxidační i redukční reakci na obou elektrodách, zůstává označení kladných a záporných elektrod nezměněno [2].

1.1 Druhy baterií

Jedním z nejdůležitějších aspektů využití baterií v elektromobilech, případně plug-in hybridech, je jejich kapacita. Ta se ve vozidlech pohybuje v rozsahu od 16 do 90 kWh, což ovlivňuje celkový dojezd elektromobilu. Dalšími důležitými vlastnostmi jsou dojezdová vzdálenost, životnost a nezbytná péče o baterie [1]. Kapacita baterií v jednotlivých elektromobilech se liší zejména podle účelu. Menším městským vozidlům vystačí baterie s menší kapacitou nežli velkým rodinným SUV. Dále je podstatné rozlišovat mezi kapacitou nominální a reálnou, tedy tou, kterou lze skutečně využít. Rozdílová část kapacity má za cíl ochránit celou baterii před jejím poškozením nebo zničením v situaci, kdy by byla využita do jejího úplného maxima [3].

1.1.1 Nikl-kadmiové baterie

Nikl-kadmiové baterie zvládají velmi dobře úplné vybití. Jejich dojezdy jsou oproti oloveným až o 50 % větší a zároveň dosahují životnosti okolo 1 500 nabíjecích cyklů, nebo 120 000 najetých kilometrů [4]. Špina také zmiňuje problém nikl-kadmiových baterií, konkrétně vysokou toxicitu použitého kadmia. Baterie byly použité například ve vozech Peugeot 106 électrique, nebo Citroen Berlingo électrique [3].

1.1.2 Nikl-metal hydridové baterie

Nikl-metal hydridová baterie byla vyvinuta po desítky let trvajícím výzkumu sponzorovaným společnostmi Volkswagen a Daimler-Benz, kde oproti předchozím nikl-kadmiovým článkům dokázala nabídnout až 2,5krát větší kapacitu. K obměně došlo na záporné elektrodě výměnou toxického kadmia za speciální slitinu obvykle složenou z niklu, kobaltu, manganu, případně hliníku a jiných vzácných kovů. Další výhodou byla i její dlouhá životnost na rozdíl od Li-ion baterií, která se odvíjela od počtu nabíjecích cyklů [5].

Setkat jsme se s ní mohli ve vozech Toyota Prius první generace a vydržel i do generace druhé vyráběné mezi roky 2003 až 2009. Následující generací už ovšem přešel k dnes standardním, nejčastěji využívaným, Li-ion bateriím [5].

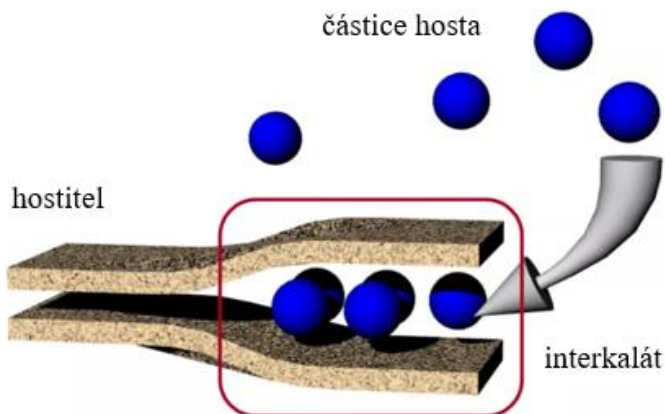
1.1.3 Li-ion baterie

První návrhy těchto baterií se objevily až v roce 1960, kde převážná část vývojových prací byla prováděna v Bellových laboratořích [6]. Potenciál lithia, jako materiálu, byl zaznamenán už na počátku 20. století, kvůli jeho nízké hustotě, vysokému elektrochemickému potenciálu a vysokému poměru energie k hmotnosti. K jeho prvnímu komerčnímu využití jsme se dostali až v roce 1991, kde ho společnost Sony představila ve svých fotoaparátech. Tehdy byl největším soupeřem právě nikl-kadmiový článek. Ten ho převyšoval díky schopnosti akumulovat dvakrát větší náboj v baterii stejné velikosti, ale také vyšší napětí článku. Mezi dalšími výhodami, která posunuly Li-ion vpřed patří nižší dopad na životní prostředí nebo pomalejší samovybíjení [7].

V dnešní době se tedy jedná o nejběžněji používaný druh baterií v oblasti elektromobility. Můžeme se s ním setkat u vozů napříč trhem od největších gigantů jako je Tesla a BMW, po menší a levnější jako jsou automobily značky Geely nebo Roewe. Bakalářská práce se jím z těchto důvodů bude věnovat podrobněji.

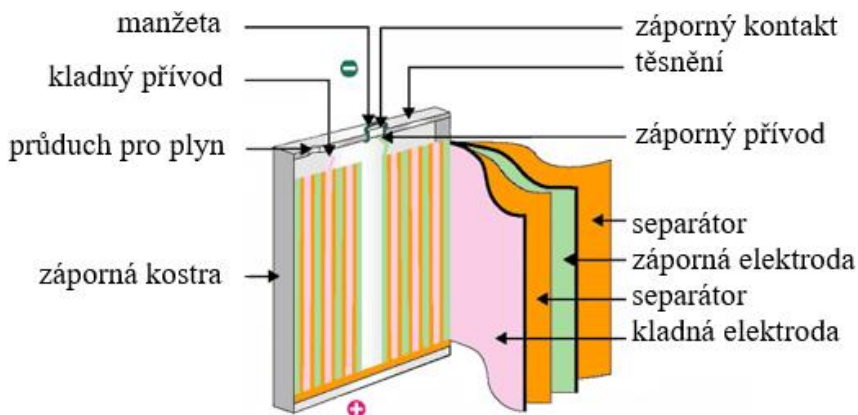
2 Princip fungování Li-ion baterií

Bateriový článek se skládá z kladně a záporně nabitých elektrod, porézního polymeru (separátoru), kladného a záporného pólu, bezpečnostního ventilu a víčka. V tomto druhu baterie se jako elektrody běžně používají interkalační sloučeniny. Tyto sloučeniny nejsou tak reaktivní, jako čisté kovové lithium, které má vysokou reaktivitu s kyslíkem, což zvyšuje riziko požáru a komplikuje jeho hašení pomocí vody. Čisté lithium je čím dál častěji nahrazováno lithiovými ionty interkalujícími do jednotlivých materiálů. Proces interkalace je znázorněn na obrázku 2.1.



Obr. 2.1 Interkalační proces [8]

Na obrázku 2.2 lze vidět složení Li-ion akumulátoru. Separátor zajišťuje úplné oddělení elektrod a zároveň umožňuje volný pohyb iontů mezi nimi, což umožňuje proudění elektrického proudu. Tyto baterie obvykle disponují ochranným kovovým pláštěm vybaveným tlakovou pojistkou, která je navržena pro případ přebíjení a možného úniku plynů [3].



Obr. 2.2 Struktura lithiového akumulátoru [9]

Kladná elektroda bývá vyrobena z hliníku a na ní nanesen katodový materiál [9]. Záporně nabitá elektroda z mědi a na ní nanesena grafitová vrstva [10].

Mezi výhody těchto druhů baterií patří vyšší energetická hustota, nejen objemová ale i hmotnostní, nízká míra samovybíjení, široký teplotní rozsah funkčnosti baterie, dlouhodobá a bezpečná skladovatelnost, nenáročná údržba článků a dlouhá životnost bez vlivu na výkon baterie [9].

Hlavní nevýhody zahrnují samotné použití lithia, které při kontaktu se vzduchem a vlhkostí degraduje a ztrácí své vlastnosti, vyšší počáteční náklady, ztrátu kapacity baterie při přebíjení, akumulátor ztrácí maximální kapacitu v čase, a to i pokud není aktivně používán. Dále ztráty výkonu lithiových akumulátorů při nízkých teplotách a potřebu ochranných obvodů k zamezení úplného vybití akumulátoru. [9].

2.1 Elektrody

Elektrody mohou být kladně nebo záporně nabitě, a jejich složení se může lišit podle použití. Na kladné elektrodě probíhají redoxní reakce, při kterých se uvolňují elektrony. Naopak záporná elektroda elektrony přijímá. U sekundárních článků si během cyklů elektrody mění své role a proces se může opakovat v opačném směru. Původně záporná elektroda se stane kladnou a začíná uvolňovat elektrony.

V rámci vývoje a vylepšování používaných materiálů došlo v uplynulých letech k obrovským pokrokům. Automobilky se i díky nařízením stále více upínají směrem k udržitelnějším způsobům transportu a alternativním zdrojům energie. Jedním z lídrů a průkopníků elektromobility je společnost Tesla a BP se zaměří na katodové materiály používané v jejich bateriích.

Všechny baterie využívané ve vozech Tesla jsou Li-ion, ale ne všechny jsou zcela stejné, Můžeme sledovat určitý vývoj během let, kde je hlavním záměrem minimalizovat množství nebezpečného kobaltu a zvyšovat podíl niklu, což by snížilo náklady na výrobu a vylepšilo energetickou hustotu. Kobalt hraje také důležitou roli v životnosti baterie a bezpečnosti provozu, tudíž najít jeho vhodnou náhradu je klíčové [10].

2.1.1 Katodový materiál NCA

Materiál NCA, neboli LiNiCoAlO_2 , byl v minulosti používán zejména v souvislosti elektrických vozidel. Zmíněný katodový vrstevnatý materiál dosahuje hodnot kapacit při experimentech okolo 200 mAh/g, přičemž teoretická hodnota kapacity je 279 mAh/g, typické napětí proti lithiu je 3,7 V [11]. Gravimetrická hustota bateriového článku se pohybuje v rozmezí 200 až 260 Wh/kg. [12]

Nabitě NCA články se projevují prudkými reakcemi při Thermal runaway. Dosahují vyšších teplot a více uvolněného nebezpečného plynu do okolí oproti novějším LFP. [11]

Když Tesla začínala a tvořila své první modely vozidel, byly možnosti výběru vhodných akumulátorů omezené. V důsledku toho se rozhodla použít válcové baterie typu 18650 s chemickým složením oxidu lithia, niklu, manganu a kobaltu, které byly původně vyvinuty pro obecná použití. Využívány byly v Tesla Model S a Model X [13]. Baterie s využitím tohoto materiálu mají vysokou energetickou hustotu, a to je předurčovalo k využití ve verzích long range, tedy dlouhého dojezdu [10].

2.1.2 Katodový materiál NMC

Obdobně jako u NCA je i pro materiál NMC, neboli $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, typická jeho vrstevnatá struktura. Vznik tohoto nového materiálu byl motivován nestabilitou jiného katodového materiálu LiNiMnO_2 , jehož obsahu niklu vedl k výskytu různých vad [11].

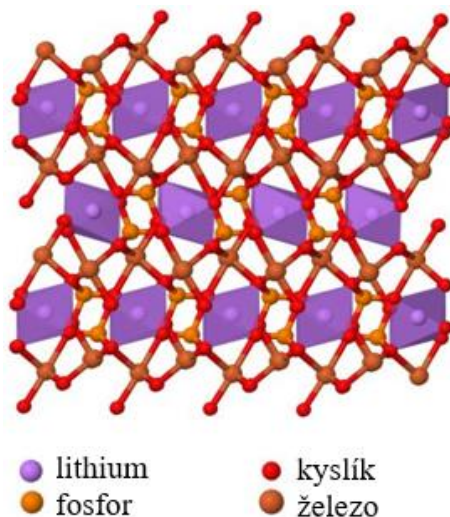
U tohoto materiálu teoretická hodnota kapacity dosahuje 280 mAh/g. Výhodou materiálu je vysoká gravimetrická hustota energie, 150 až 220 Wh/kg [12], tedy množství energie na jednotku hmotnosti, což je zajištěno vysokým potenciálem vůči lithiu, ale také velkou kapacitou. Materiál se rovněž vyznačuje vysokou teplotní stabilitou a nízkou hodnotou reaktivity vůči použitému elektrolytu. Nevýhodou je použití kobaltu [11].

V rámci vývoje vyvinula Tesla nový typ baterie 21700, ta má nižší vnitřní odpor, efektivnější nabíjecí schopnosti, a dokonce to zjednodušilo montážní proces, neboť nebylo třeba propojovat mezi sebou takové množství prvků [13].

Tesla Model 3 byl prvním reprezentantem nových typů baterií, za kterým následoval Model Y fungujícím na obdobných akumulátorech [13].

2.1.3 Katodový materiál LFP

Katodový materiál LFP, neboli LiFePO_4 , vznikl na konci 20. století a jedná se o materiál s olivínovou strukturou a má kosočtverečnou krystalografickou soustavu, viz. obrázek 2.3. Díky přítomné tunelové struktuře mohou ionty lithia jednoduše interkalovat a deinterkalovat.



Obr. 2.3 Krystalografická soustava LFP [14]

Teoretická hodnota kapacity bateriového článku je 170 mAh/g, je tedy o něco vyšší oproti 148 mAh/g čistého LiCoO_2 a markantněji větší oproti 110 mAh/g u LiMnO_2 [11], gravimetrická hustota dosahuje 90 až 120 Wh/kg [12]. Mezi hlavní výhody patří dobrá dostupnost, díky využívaným materiálům i nízká cena. Kvůli olivínové struktuře i vysoká stabilita při vyšších zatíženích, nízká reaktivita s elektrolytem a podstatně vyšší bezpečnost, protože nedochází k uvolňování kyslíku ze struktury, výhodou je možnost vyhnout se použití kobaltu [11].

V roce 2022 Tesla vstoupila na trh s prvním vozem využívajícím baterie typu 4680 s využitím tohoto materiálu. Jednalo se o Tesla Model Y a nové řady Modelu 3 [13].

2.2 Elektrolyt

Hlavním úkolem elektrolytu je umožnit přenos iontů lithia mezi elektrodami. Elektrolyt musí být schopen iontové vodivosti a zároveň být chemicky inertní vůči ostatním součástem baterie. Existuje hned několik základních druhů elektrolytů, které rozdělujeme na základě vlastností a formy materiálu, a to kapalné, keramické, gelové nebo ve formě tuhého polymeru. V praxi se nejčastěji používají elektrolyty tekuté, kvůli jejich vysoké iontové vodivosti. Obsahují lithnou sůl rozpuštěnou v organickém rozpouštědle, jež by mělo mít vysokou dielektrickou konstantu, malou viskozitu a nízkou teplotu rozpouštění. Zatím se nevytvořila látka, která by dokonale splňovala všechny zmíněné požadavky, tak se používají směsi různých látek [15].

První komerčně použitou lithnou solí byla LiPF_6 . Tato sůl má sice nízkou teplotní stabilitu a citlivost na vlhkost, zato slouží jako ochrana katody proti korozi, splňuje požadavky na různá omezení a má vysokou iontovou vodivost. Mezi další soli patří např. LiBF_4 nebo LiCO_4 , která sice disponuje dobrou vodivostí, stabilitou při různých vlhkostech okolí a je méně hygroskopická, ale vykazuje silné oxidační vlastnosti s většinou organických látek [16] [17].

Gelové elektrolyty, označované jako GPE, se většinou skládají z kapalného elektrolytu smíchaného s polymerní složkou v určitém poměru, tak aby se polymerací dosáhlo požadované gelové struktury o žádaných fyzikálních i chemických vlastnostech. Pro správnou fixaci jsou podstatné polymerní matrice, hlavně PMMA, PVDF a PEO, poskytující vysokou iontovou

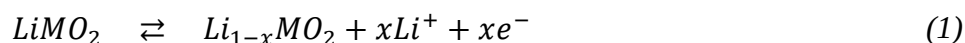
vodivost. Avšak jejich nedostatkem jsou velmi špatné mechanické vlastnosti, změkčení polymeru po zavedení kapalného elektrolytu do polymerní matrice. Tuto situaci lze vyřešit použitím polyethylenu nebo netkaných textilií. Nicméně to může mít za následek snížení iontové vodivosti gelového elektrolytu [18].

Nejaktuálnějším by měl být akumulátor s elektrolytem pevným, který by měl předčít dosud dominantní Li-ion akumulátory. Díky nim by se měla prodloužit dojezdová vzdálenost, s ohledem na snížení váhy automobilu a zrychlit nabíjení. Vývojáři také vidí potenciál v oxidových elektrolytech, i když jejich zpracování vyžaduje velkou spotřebu energie. Navíc má tento elektrolyt špatnou iontovou vodivost. Pevnými elektrolyty pro budoucnost by mohly být sulfidové, neboť se s nimi jednoduše pracuje. Materiál je měkčí, poddajnější a pružnější než oxidový elektrolyt. Ovšem sulfidové elektrolyty jsou dostupné jen v omezeném množství a jejich chemická kompatibilita s kovovým lithiem a materiálem vysokonapěťové katody je omezená [19].

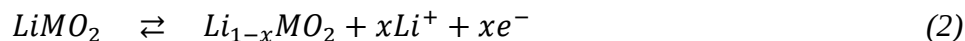
2.3 Chemické reakce článku

Elektrochemické děje v článku můžeme rozdělit na oxidaci na kladné elektrodě a redukční reakci na záporné elektrodě.

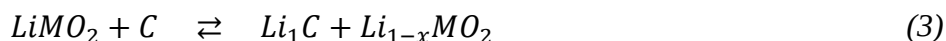
Rovnice pro kladnou elektrodu [20]:



Rovnice pro zápornou elektrodu [20]:

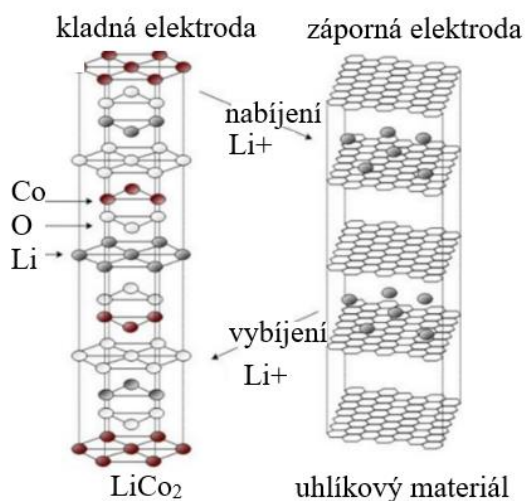


V souhrnu [20]:



Písmeno M symbolizuje kov využitý v aktivní vrstvě kladně nabitých elektrod, který částečně určuje charakteristiky článku. Na obrázku 2.4 je popsán princip, na kterém funguje lithiový akumulátor a naznačen pohyb iontů při nabíjení a vybíjení.

Mezi nejčastěji používané kovy, které by mohly stát na místě M jsou mangan (Mn), nikl (Ni), kobalt (Co), železo (Fe), jejich směsi a kombinace. Z uvedených rovnic je patrné, že elektrolyt plní funkci iontového nosiče a nemá vliv na probíhající elektrochemické reakce. Z tohoto důvodu jsou Li-ion baterie navrženy tak, že mají minimální spotřebu elektrolytu [9].



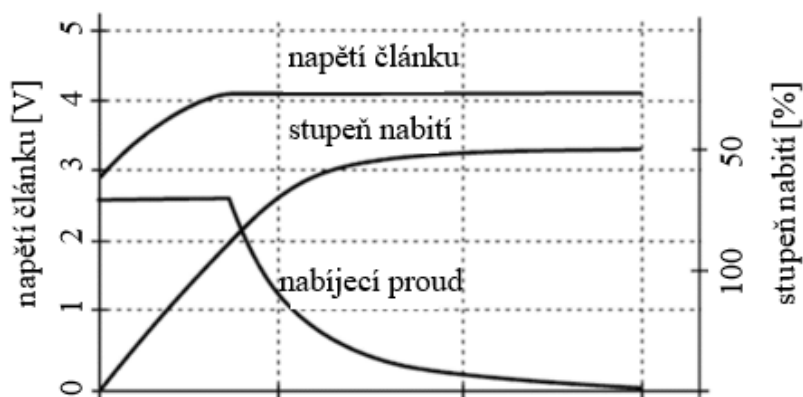
Obr. 2.4 Princip funkce lithiového akumulátoru [9]

2.4 Proces nabíjení a vybíjení

Nabíjení probíhá standardně z externího zdroje napětí s omezením proudu. Musí být dodrženo nabíjecí napětí, i při malém překročení může dojít ke zkrácení životnosti baterie. Při vyšším překročení uniká CO_2 a zvyšuje se tlak v akumulátoru. Při použití nižšího napětí, než je doporučeno, nedojde k poškození baterie, ale nedojde k jejímu plnému nabití [21] [22].

Nabíjecí proces probíhá ve dvou opakujících se fázích, které jsou obecně označovány CC-CV (Constant current, Constant voltage)¹. V první části je článek nabíjen konstantním proudem, dokud nedosáhne maximálního napětí, kdy je akumulátor nabit na určitou hodnotu kapacity, konkrétní procentuální míra nabití se může lišit dle výrobce a typu baterie. Ve druhé části je nabíjen konstantním napětím, než poklesne proud pod výrobcem předepsanou mez. Dobu nabíjení není potřeba sledovat ani korigovat, nedochází ke přebíjení a akumulátor může zůstat v nabíječce i nadměrně delší dobu [21].

Na obrázku 2.5 je vykreslena závislost nabíjecího proudu a napětí článku v čase. Vykreslená závislost je typická pro Li-ion akumulátory a je z ní patrné, že se nabíjí poměrně rychle.



Obr. 2.5 Průběh napětí a proudu Li-ion článku v čase [23]

¹ Konstantní proud, konstantní napětí

Tab. 2-1 Srovnání vlastností Li-ion akumulátorů [11]

Technologie	Elektrodový materiál	Teoretická kapacita [mAh/g]	Gravimetrická hustota [Wh/kg]	TR [°C]	Životnost [nabíjecích cyklů]
NCA	LiNiCoAlO_2	279	200 až 260 [12]	150	500
NMC	$\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$	280	150 až 220 [12]	210	1000 až 2000
LFP	LiFePO_4	170	90 až 120 [12]	270	>2000

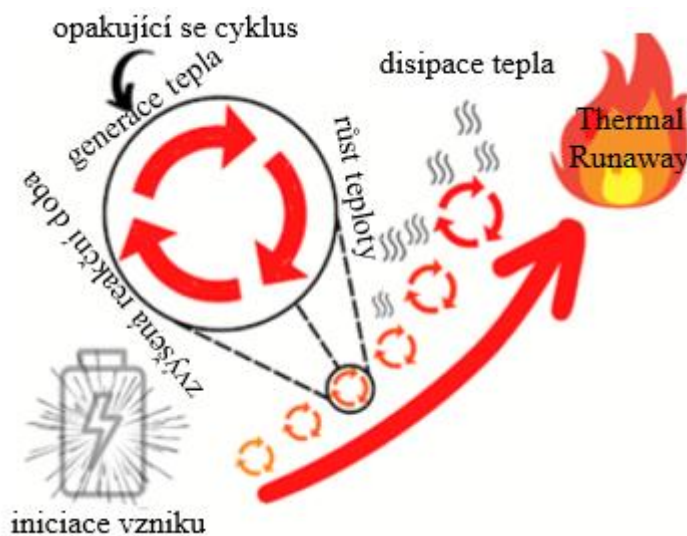
Tabulka 2-1 srovnává klíčové vlastnosti použitých technologií a katodových materiálů, v kontextu nejen kapacit, ale i životnosti, tedy počtu nabíjecích cyklů, které by měly zvládnout bez narušení funkčnosti. Tato vlastnost je samozřejmě závislá i na teplotě, nabíjení a přebíjení a pracovním prostředí, hodnoty se tedy mohou lišit. Tabulka také zobrazuje i teploty vznikající při jevu Thermal runaway. NMC má sice nejnižší teplotu jevu, ale vyšší nabití podporuje vznik TR. U NCA je podporou vzniku právě úplné nabití. LFP je naopak bezpečné při jakémkoli stavu nabití, riziko požáru se nezvyšuje s vyšším stupněm nabití [11].

3 Thermal runaway

Jedním z nejvýznamnějších nedostatků používání baterií je požadavek, aby pracovaly v poměrně úzkém teplotním rozsahu. Bezpečnost a stabilita bateriových článků závisí na udržování vnitřních teplot v určitých mezích. Pokud teplota překročí kritickou úroveň na obou koncích, může dojít k termálnímu úniku, což může baterii nejen poškodit, ale i způsobit požár [24].

Jedná se o řetězovou reakci, ke které dojde uvnitř bateriového článku, kterou může být jen velmi obtížné zastavit, jakmile začne. Nastane, pokud teplota uvnitř článku dosáhne bodu, který způsobí chemickou reakci produkující více tepla. Dojde k radikálnímu zvýšení teploty, tím se utvoří další reakce produkující ještě více tepla a tedy i další zvyšování teploty, jak je naznačeno na obrázku 3.1 [24] [25].

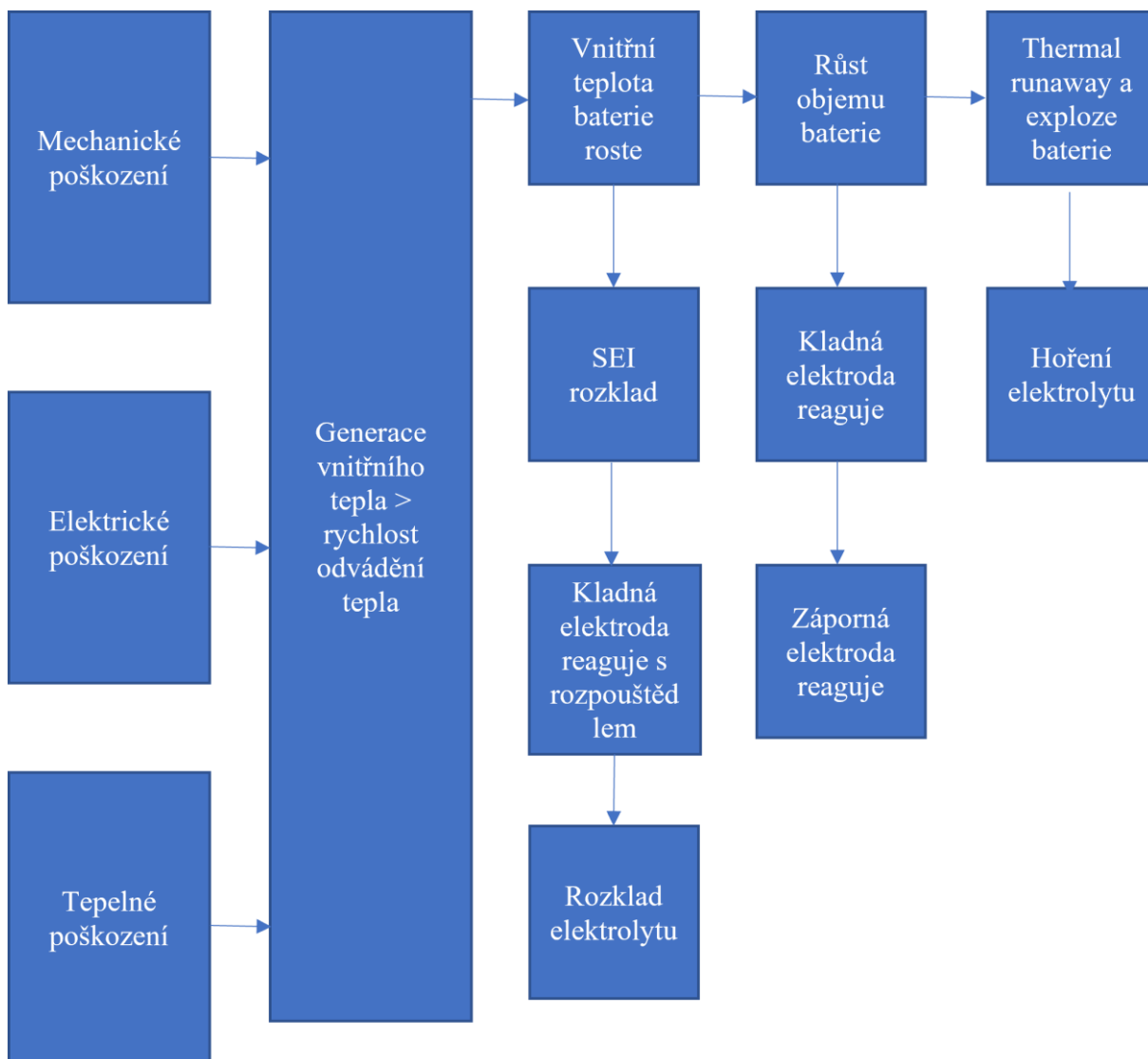
Při Thermal runaway stoupá teplota opravdu rychle, jedná se o velmi krátký časový úsek, v rámci milisekund. Energie, která byla uložena v článku, je náhle uvolněna a dochází ke skokovým změnám teplot dosahujících stovek až tisíce stupňů Celsia. Takto vysoké teploty mohou způsobit vylučování nebezpečných plynů z baterie a obtížně uhasitelný požár [25].



Obr. 3.1 Thermal runaway [26]

3.1 Příčiny vzniku

Důvodů ke vzniku jevu Thermal Runaway je velké množství. Mezi nejčastější patří přebíjení nebo přílišné vybíjení, vnitřní a vnější zkrat, vysoká teplota okolního prostředí nebo mechanické poškození. Tyto příčiny na sobě jsou závislé a vzájemně provázané. Jejich propojení a důsledky jsou vyobrazeny na obrázku 3.2 [24].



Obr. 3.2 Příčiny a důsledky Thermal runaway [24]

3.1.1 Vnitřní zkrat

Typy vnitřních zkratů lze rozdělit do tří kategorií, podle mechanismu spouštění. První kategorií je zkrat vygenerovaný samotnou baterií, druhá kategorie je vnitřní zkrat způsobený přebíjením nebo přílišným vybíjením baterie a třetí kategorií je vnější mechanické poškození, které může zkrat způsobit. První typ může být způsoben interními problémy baterie, takový typ vnitřního zkratu je obtížné najít a má dlouhou dobu působení. Druhý typ vnitřního zkratu je hlavně způsoben některými jehlicovitými krystalickými větvemi během procesu přebíjení nebo vybíjení. Jehlicovité větve se akumulují a propíchnou membránu baterie, což způsobí vnitřní zkrat. Třetí typ je obvykle způsoben dopravní nehodou, která způsobí protržení nebo stlačení baterie. Tuto situaci je skoro nemožné předvídat a předcházet ji lze pouze zlepšením ochranných mechanismů [24].

3.1.2 Vnější zkrat

Projde-li baterie procesem vnějšího zkratu, teplota baterie rapidně vzroste. Ve stavu vnějšího zkratu se generuje velký proud a uvolňuje se množství Jouleova tepla. Když teplota stoupne nad určitou úroveň a bezpečnostní zařízení nefunguje, začne se elektrolyt uvnitř baterie vypařovat, což způsobí nafouknutí baterie a v závažných případech uvolní hořlavý plyn.

Podmínky vnějšího zkratu často způsobují, že elektrické jiskry zapalují hořlavé plyny v okolí, což představuje velmi nebezpečnou závadu a může indukovat další problémy [24].

3.1.3 Přebíjení

Bylo provedeno mnoho výzkumů na téma přebíjení baterií. Když je baterie přebíjena, po naplnění úložného prostoru záporné elektrody budou ionty lithia pokračovat ve hromadění poblíž záporné elektrody, což postupně způsobí vznik kovového lithia. S prohlubujícím se stupněm přebíjení se na povrchu záporné elektrody postupně budou pomalu formovat dendrity a akumulované krystaly lithia nakonec propíchnou membránu a způsobí vnitřní zkrat v baterii [24].

3.1.4 Přílišné vybíjení

Při nadměrném vybití baterie bude nejprve poškozena struktura aktivního materiálu uvnitř baterie, což způsobí trvalé poškození kladné a záporné elektrody lithiové baterie. Z mikroskopického hlediska výboj uvolní lithiové ionty záporné elektrody. Přílišné vybíjení nakonec zničí strukturu záporné elektrody a výrazně sníží životnost baterie. Během výboje bude potenciál poblíž záporné elektrody baterie stoupat. Když se potenciál záporné elektrody zvýší natolik, že překročí rozpustný potenciál kolektoru proudu z mědi, dojde k rozpuštění kolektoru. V této době se rozpuštěné ionty mědi pomalu prostřednictvím separátoru dostanou poblíž kladné elektrody baterie a budou sníženy na kovovou měď. Nepřetržitě se hromadící kovová měď se bude pomalu zvětšovat a nadměrně zvětšená kovová měď propíchně membránu baterie a způsobí vnitřní zkrat uvnitř baterie [24].

3.2 Hašení bateriových článků

Baterie dosahují při požáru vysokých teplot a s tím je i spojen problém s jejich hašením. Standardní hasicí přístroje na bázi vody, pěny nebo prášku jsou nedostačující a musí se tak využívat speciálně vyvinuté prostředky pro hašení lithiových baterií. Ideálním hasicím přístrojem by měl být takový, který je velmi vysoce tepelně vodivý, zároveň by měl fungovat jako elektrický izolant. Takový však stále neexistuje. Při hašení se tedy snažíme dojít ke kompromisnímu řešení obou zmíněných vlastností.

Izolační pěna je často využívána k hašení požárů, jelikož dokáže efektivně oddělit hořící objekt od okolí a zabránit šíření ohně. Nicméně, když je aplikována na baterii, která hoří a uvolňuje popel a saze do deionizované vody, stává se tato voda vodivou. Tím se ztrácí schopnost izolovat a chránit před elektrickým proudem. Voda je sice schopná výborně odvádět teplo, ale není schopná poskytnout dostatečnou izolaci v případě elektrického požáru. Naopak, plyny a aerosoly, které jsou dobrými elektrickými izolanty, mají nižší tepelnou vodivost a obtížněji dosáhnou hořícího zdroje. Hašení pomocí izolační pěny tedy může být účinné v některých situacích, ale nedokáže adekvátně ochladit hořící objekt [27].

Při hašení lithiových baterií ponorem do kontejneru s vodou je důležité si uvědomit, že ani po uplynutí dlouhé doby nemusí být všechny články baterie zcela vyzkratované a může na nich přetrvávat elektrické napětí. Použití slané vody může urychlit pronikání vody do článků, tím i zrychlit jejich zkratování. Objem vody potřebný pro úplné uhašení baterie rapidně vzrůstá, pokud nemá baterie žádnou vnitřní ochranu proti šíření ohně mezi jednotlivými bateriovými články [27].

Během testování hašení baterií vodou nebyl zaznamenán žádný přenos elektrického proudu přes proud hasicí vody. Standardní hasičský oblek se ukázal jako adekvátní ochrana proti riziku úrazu elektrickým proudem. Při hašení požáru Li-ion baterií se hasičům doporučuje použití plynové masky. S vestavěnými bezpečnostními ventily v bateriových člancích nehrozí riziko exploze během požáru. Nicméně, v uvolněných plynech může docházet ke vzniku elektrických oblouků. Voda použitá k hašení Li-ion baterií je kontaminována kousky kovů a

pH této vody se pohybuje v rozmezí 6 až 11. Pro likvidaci zbývajících částí baterií po požáru se doporučuje používat osobní ochranné pomůcky a dýchací masku a vyvarovat se přímému kontaktu kůže s ohněm postiženými částmi baterie [27].

3.3 Preventivní opatření

Systémy používané k zabránění nebo předejití Thermal runaway jsou buď externí, řídící externí teplotu a elektricky izolují buňku, nebo interní, které zabráňují procesům generujícím teplo uvnitř buňky. Interní systémy často přidávají menší objem, ale mohou být nákladnější na implementaci. Některé systémy jsou účinnější než jiné a preventivní opatření lze kombinovat, spojovat jejich účinky a zvyšovat tak celkovou bezpečnost. [28]

3.3.1 Thermal Management Systems

Systémy termálního řízení mají za cíl udržovat Li-ion články v bezpečných teplotních limitech během provozu a v klidových obdobích. Tyto systémy obvykle obsahují dva komponenty: oběh chladicí kapaliny nebo pasivní izolaci kolem článků k zabránění Thermal runaway, dále TR. Zatímco interní systémy jsou kompaktnější a mohou být dražší na implementaci. V těchto systémech jsou používány různé metody, jako jsou tepelně vodivé grafitové listy a ohnivzdorné filmy, k rozptýlení tepla a zabránění šíření TR [28].

Volba chladicí kapaliny pro Li-ion baterie je klíčová a zahrnuje kompromis mezi účinností a přidaným objemem. Aktivní metody jako kapalné chlazení nabízejí lepší tepelnou vodivost a rovnoměrnost, ale přidávají mechanickou složitost, zatímco materiály s fázovou změnou poskytují kompaktnost, ale mohou mít nižší tepelnou vodivost. Navzdory těmto pokrokům může selhání chladicích systémů stále vést k přehřátí článků, což vyžaduje neustálé monitorování zdraví článků pomocí správce baterie [28].

3.3.2 Battery Management Systems

Battery Management System (BMS) je elektronický systém, který monitoruje stav článků uvnitř baterie, vypočítává sekundární údaje a používá tyto informace k řízení vyvažování nabití, vybíjení a teplot článků. BMS detekuje, když je baterie znehodnocena nebo zneužívána, a řídí rizika pomocí zmírňujících opatření, například elektricky izoluje či blokuje jeden či více článků. Návrh BMS, včetně provozního napětí, maximálního proudu a objemu, je specifický pro aplikaci, přičemž požadavky se liší pro automobilové baterie a stacionární baterie [28].

Jedním ze základních prvků BMS je vyvažování článků, které je nezbytné pro rovnoměrné nabíjení baterie a prodloužení životnosti. Existují dva typy vyvažování baterie: pasivní a aktivní. Pasivní vyvažování odvádí energii z nejvíce nabitého článku jako teplo pomocí rezistivních vyvažovačů, zatímco aktivní vyvažování odebírá energii z nejvíce nabitého článku a redistribuuje ji na ostatní články pomocí konvertorů. Aktivní vyvažování je účinnější, ale nákladnější a je doporučeno pro aplikace, kde by pasivní vyvažování bylo obtížné, jako jsou velké balíčky s nesourodivými články nebo články, které operují při vysokých teplotách. BMS musí také detekovat počátek termálního rozpadu a provádět opatření ke zmírnění rizik. Zmírňující opatření mohou zahrnovat uzavření celého bateriového systému nebo jedné jeho části, spuštění termálního řídicího systému nebo uvolňování inertního plynu k potlačení ohně [28].

3.3.3 Cell-Level Mechanisms

Inovace v technologii Li-ion baterií byly zaměřeny na prevenci TR tím, že se zabývají problémy na úrovni struktury buňky. Úpravy elektrod jsou klíčové pro minimalizaci rizika vnitřních zkratů. Zohlednění zahrnuje vyhýbání se geometriím náchylným k ukládání lithia a výběr stabilních katodových materiálů, jako je LFP, který prokazuje větší tepelnou stabilitu ve srovnání s jinými katodovými materiály. Složení elektrolytu je dalším klíčovým faktorem při prevenci TR, přičemž nedávné pokroky se zaměřují na vývoj stabilních elektrolytů schopných

odolávat vyšším napětím a rychlému nabíjení. Pevné elektrolyty a vodné roztoky se objevují jako slibné alternativy, nabízející vylepšené bezpečnostní funkce [28].

Návrh separátoru hraje klíčovou roli při prevenci TR tím, že integruje materiály s vyšší tepelnou odolností a mechanickou integritou. Nedávný výzkum zkoumá kompozitní separátory kombinující polymery s keramikou k vylepšení vlastností tepelného odpojení a prevence tvorby lithiových dendritů. Kromě toho jsou do elektrod a polymerních pojiv integrovány teplotně citlivé přísady, jako jsou materiály s pozitivním teplotním koeficientem, které regulují vodivost buňky na základě změn teploty. Tyto materiály mohou dramaticky snížit vodivost nad určitou teplotou a působit jako ochrana proti TR. Výzkum jak polymerových, tak keramických přísad pokračuje, s důrazem na zajištění kompatibility a účinnosti při prevenci nechtěných vedlejších reakcí v baterii. Celkově nabízejí pokroky v návrhu struktury buňky slibné cesty ke zlepšení bezpečnosti a spolehlivosti Li-ion baterií v různých aplikacích, včetně elektromobilů [28].

4 Požáry elektromobilů

Požáry jsou jedním z rizik, spjatým s provozem nejen elektrických vozidel. S rostoucím počtem EV a PHEV lze lépe dokumentovat opakované příčiny vzniku požáru, a tak detekovat kritické místo baterie a elektricky poháněných vozidel. Nejčastěji začíná při samovznícení požár právě u bateriového úložiště energie. Z hlediska pohonu lze baterii přirovnat ke kapacitě naftě nebo benzínu v klasickém spalovacím motoru. Proto je hoření EV spojené s rizikem požáru a nebezpečím spojeným s bateriovými články a napájecími systémy. Obecně platí, že čím větší je počet bateriových článků a čím větší množství energie uchovávají, tím větší je riziko požáru [29].

Počet baterií použitých v osobních elektromobilech bývá velmi vysoký, stovky i tisíce bateriových článků [1], což je nezbytné k funkčnosti, jelikož spotřeba energie EV oproti běžné elektronice je mnohonásobně vyšší [30]. Samotné bateriové články jsou sériově i paralelně propojeny, aby vytvořily bateriový modul. Rámem jsou zafixovány v určité poloze a zároveň jsou tak chráněny před vnějšími rázy, vibracemi a teplem [29].

4.1 Rizika vzniku požáru

Od chvíle, kdy se staly Li-ion baterie hlavním zdrojem energie pro EV, se jeví riziko požárů jako významný bezpečnostní problém. Souvisí to nejen s rostoucím počtem využití, ale i s vysokou energetickou hustotou bateriového článku. Když je Li-ion baterie vystavena vnějšímu rázu a extrémním provozním podmínkám, může dojít k jejímu poškození, tvorbě jisker, hořlavých plynů a toxického kouře, které mohou být dále zapáleny a vést k dalšímu hoření nebo plynové explozi [30].

Ačkoli má bateriový systém EV nízkou pravděpodobnost samovznícení, je zranitelný vůči vnějším tepelným, mechanickým a elektrickým nárazům při extrémních podmínkách. Tyto podmínky jsou u přenosných elektronických zařízení vzácné, ale pro EV jsou běžné kvůli častému zrychlování a zpomalování a jejich vystavování neočekávaných situací v běžném provozu. Navíc, kapacita baterií EV je mnohem větší, což zvyšuje riziko požáru v případě tepelného úniku. Nicméně, pokročilá bezpečnostní opatření v konstrukci EV snižují pravděpodobnost selhání, takže není vhodné hodnotit a srovnávat riziko požáru v EV na základě přenosných elektrických zařízení [29].

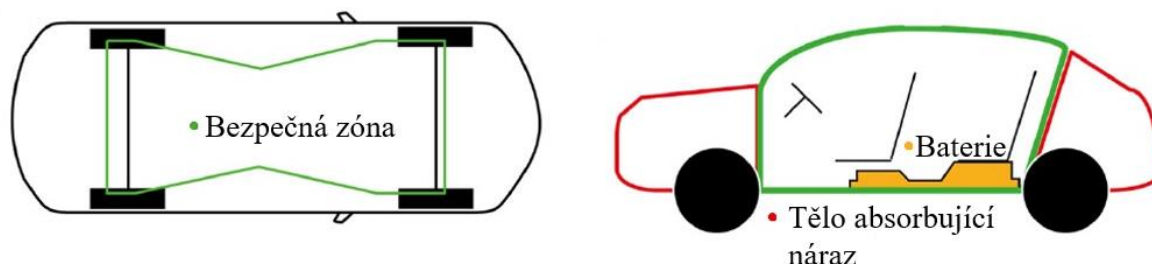
4.1.1 Teplotní vlivy

Očekává se, že EV budou fungovat za různých podmínek, ale podobně jako lidé, tak i baterie fungují nejlépe za normálních teplot, tedy v rozmezí 20 až 30 °C. Extrémně vysoké či nízké teploty mohou mít negativní vliv na funkčnost a výkon baterie a snižovat její životnost. Při vyšších teplotách navíc může docházet k chemickým reakcím způsobujícím přehřívání baterií. Pokud má baterie špatnou schopnost odvádění tepla, může dojít k TR, což by mohlo indukovat vznik požáru elektromobilu. Naopak při nižších teplotách se zvyšuje vnitřní odpor baterie, což může vést k růstu kovových dendritů a dalším zahřívacím účinkům uvnitř baterie vedoucím k případnému vzniku požáru [29].

4.1.2 Mechanické vlivy

Většina Li-ion článků je sama o sobě poměrně křehká, a tak je důležitým bezpečnostním prvkem ochranná vrstva a místo, kde je ve vozidle umístěna [29].

Baterie jsou obvykle integrovány do zpevněných oblastí vozidla, tzv. bezpečných zón, naznačených na obrázku 4.1, s cílem eliminovat riziko proniknutí během srážky. Při vysokých rychlostech srážek však ani tato ochrana nemusí být dostatečná a může dojít k proniknutí do bateriového obalu [29].



Obr. 4.1 Umístění baterií v EV [29]

4.1.3 Přetěžování elektrického systému

Touha po rychlém nabíjení a vybití u EV má negativní vliv na riziko požáru. Li-ion baterie jsou navrženy s určitými nabíjecími limity, a jejich překročení může snížit výkon nebo vést k jejich předčasnému selhání. Elektrické přetěžování je obvykle doprovázeno Jouleovým ohřevem a chemickými reakcemi, což může vést k interním zkratům. U mnoha EV není elektrické přetěžování možné, pokud je BMS správně navrženo a funguje. Vedle selhání bateriového článku mohou vzniknout případy samovznícení kvůli nedostatečným výrobním nebo návrhovým postupům [29].

4.2 Dosavadní případy hoření

Požáry u elektromobilů jsou intenzivně sledovány a globálně diskutovány, i když jejich celkový počet zůstává podstatně nižší než u vozidel se spalovacími motory. Hlavním důvodem je menší podíl elektromobilů na trhu.

Statistiky naznačují, že mnoho požárů u vozidel s konvenčními motory je způsobeno úmyslným zapálením, což ukazuje, že požáry nejsou jen otázkou hořlavosti materiálů. Očekává se, že trend požárů u elektromobilů bude podobný jako u vozidel se spalovacími motory. Hlavní příčinou požárů u elektromobilů bývá často baterie, i když existuje řada dalších faktorů, které mohou hrát roli. Tyto incidenty jsou relativně nové a složité, ale lze je rozdělit do několika hlavních kategorií [30]:

- Samovznícení zapříčiněné například vysokou vlhkostí nebo extrémními teplotami.
- Vzplanutí nabíjecího se EV. Může být způsobeno přebitím baterie, obvykle však spojeno s vadnými nabíjecími stanicemi a kabely.
- Při nehodě dojde k poškození Li-ion baterie EV, vedoucí k jejímu vzplanutí během nebo po události.
- Baterie byla vystavena teplotním vlivům a znovu vzplanula poté, co byl původní požár zlikvidován.
- Žhárství, lesní požáry nebo hořící stavby zapálí baterii nebo EV.

4.2.1 Samovznícení

Tato událost se stala v Číně, kde začalo samovolně hořet vozidlo značky Lifan. Požár začal ve spodní části vozu, kde se nacházejí bateriové články, byl doprovázen praskajícími zvuky, malými explozemi a vznikem oblaka černého kouře [29].

K incidentu došlo pravděpodobně z důvodu dlouhodobému vystavení vysoké vlhkosti, neboť byl vystaven dlouhou dobu přímému kontaktu s hustým deštěm. Voda se tak měla

možnost vsáknout do bateriového obalu a po jeho použití způsobit zkrat, po kterém mohlo následovat TR [29].

4.2.2 Vzplanutí nabíjecího se EV

Případ se stal v Praze v podzemní garáži, kde začal hořet Jaguar I-Pace, napojený na nabíjecí stanici, tzv. wallbox. Jemný bílý kouř vycházel z podvozkové oblasti vozu, kde jsou uloženy baterie. Po jeho odpojení od zdroje energie došlo k silnému záblesku a plamennému hoření [31].

Konkrétní důvod požáru a příčiny k tomu vedoucí nejsou známy a nebyly ani zkoumány a vyhodnoceny [32]. Podobné situace jsou často vysvětlovány použitím nevhodného nebo jinak poškozeného nabíjecího kabelu či stanice [29].

4.2.3 Požár po nárazu

Při nárazu o vyšší rychlosti může dojít k proražení všech ochranných vrstev až do míst uložení baterií. Při zdokumentovaných událostech, ve kterých došlo k úplnému průniku, zareagovali správně bezpečnostní systémy, které upozornily na nebezpečí a přiměli řidiče z aut vystoupit předtím, než započal požár [29].

Při podobných událostech dochází k velkým únikům toxických plynů a plamennému hoření [29].

4.2.4 Znovuzapálení

Incidenty mohou také vést k sekundárním tepelným reakcím v důsledku celkového rozsahu poškození Li-ion baterií. Existují případy, kdy došlo k opětovnému zapálení jednou nebo i vícekrát. Příkladem je Tesla Model S v USA, která se po nárazu ve vysoké rychlosti, ocitla v plamenech. A po uhašení požáru a odstranění z místa nehody znovu vzplálo [29].

4.2.5 Jiné externí faktory

Není velké množství událostí spojených s požáry EV zapříčiněné vnějšími vlivy [29]. Z bezpečnostní zprávy Tesly k roku 2021 vyplývá, že se jejich vozidla, na území USA, objevují při požárech každých zhruba 338 milionů najetých kilometrů, což je značně méně časté než 31 milionů najetých kilometrů spalovacích vozidel. A dokonce v letech 2012-2018 tvrdí, že až 15 % požárů vozidel Tesla bylo způsobeno právě externími vlivy, jako je žhářství nebo rozsáhlé požáry budov apod [33].

4.3 Likvidace požárů

Pokud je stav baterie možné spolehlivě odhadnout, mohou hasiči použít vhodný způsob hašení bezpečně. Kromě klasického hašení vodou jsou dvě hlavní metody: hasicí kontejnery a hasicí kopí [25].

Mobilní hasicí kontejnery jsou navrženy pro zaplavení poškozených elektromobilů, což zabraňuje samovznícení a deaktivuje baterii. Vozidlo musí být po zaplavení monitorováno. Tato metoda však není vhodná pro všechny nehody, protože může způsobit celkové poškození vozidla a zvýšit náklady na recyklaci. Kontejnery jsou také těžké a logisticky náročné [25]. Navíc při použití kontejneru vyvstává otázka týkající se zpracování hasební vody, která obsahuje velké množství škodlivin. Z provedených měření víme že se jedná o vody silně alkalické. Z odebraných vzorků, při zmíněném požáru v Praze, bylo analýzou zjištěno, že vody podle předpokladu obsahují lithium, a to v koncentracích okolo 10 mg/l. Dále byla zjištěna přítomnost niklu, hliníku, manganu a kobaltu v koncentracích do 1 mg/l. Voda dále obsahuje stopová množství zinku, železa a olova. Mimo tyto prvky byla určena přítomnost arsenu, ale vlivem nízké odezvy použitého detektoru byla jeho koncentrace pod mezí stanovitelnosti. Dále je možné v této směsi předpokládat přítomnost variace organických látek a přítomnost solí fluoru, které ovšem nebyly blíže určeny [32].

Hasicí kopí má výhodu přímého chlazení požáru vodou, která pronikne i do malých mezer baterie. Je však riziko, že špatné použití kopí může způsobit zkrat a TR [25].

Konečné rozhodnutí o použití těchto technologií závisí na konkrétní situaci, a budoucí kontejnery mohou být vybaveny inteligentními monitorovacími a hasicími systémy. Bezpečnější přeprava může být zajištěna použitím nehořlavých ochranných krytů [25].

Dá se využít i zakrytí nehořlavou plachtou, která zabrání přísunu vzduchu a tím pádem nemohou bateriové články dál hořet. Výhodou tohoto řešení je skladnost a aplikace i v těžko dostupných prostorech [34]. Značnou nevýhodou může být hromadění hořlavých plynů pod dekou, které mohou vyústit až k deflagraci, neboli podzvukovému spalování [35].

4.3.1 Bezpečnost

V prvé řadě je důležitá identifikace, že se opravdu jedná o EV. Zabudované automatické hlásiče jsou schopny tuto informaci podat samy [32].

Z hlediska bezpečnosti je potřeba při hašení pracovat s baterií, jako by byla neustále plně nabitá a vyhýbat se kontaktu s jakýmkoli komponenty pod napětím [32].

Kvůli tichému chodu EV nelze ihned říci, zda je vozidlo v moment požáru nastartované a tím pádem zabrzděné. Je třeba zajistit vozidlo před nenadálým pohybem [32].

Dále dává smysl, se ptát, zda nemůže dojít k poluci okolního prostředí a kolemjdoucích lidí. Dále by mělo být předmětem zkoumání, zda je hašení bezpečné i pro zasahující jednotky, do ovzduší unikají toxické látky a tělo je do sebe vstřebává i nepřímo, např. kůží [32].

4.3.2 Porovnání se spalovacím motorem

EV jsou po uhašení náchylnější ke znovuvzplanutí, takže musí být pod dohledem i po prvotním uhašení.

K uhašení požáru EV je potřeba podstatně větší množství vody než na spalovací motory.

Doba trvání zásahu je mnohem delší, ať už samotné hašení, následný ponor a likvidace a dlouhý monitoring ohořelého EV.

Všechny zmíněné body mají i vliv na výslednou cenu zásahu, která bude kvůli délce a množství vody a lidí také mnohem dražší.

4.3.3 Zhodnocení rizik požárů u elektromobilů

Ze získaných dat a údajů použitých pro tuto práci je zřejmé, že se výrobci elektromobilů musí při vývoji baterií zaměřit kromě zvýšení výkonu i na snížení rizika vzniku požáru. Všechny druhy dosavadních i budoucích případů hoření musí být výrobci analyzovány s cílem odhalit příčiny vzniku požárů. Jen podrobná analýza těchto dat může napomoci eliminovat vznik požárů v elektromobilech.

Elektromobilita je globální trend, proto by jednotlivé zjištění měly být následně standardem pro nové směrnice a zákony platné v EU i v dalších mimoevropských zemích.

5 Požáry elektromobilů v České republice

Vstupem do éry elektromobility, která přinese znatelné ekologické výhody, se tvoří i otázky týkající se bezpečnosti a spolehlivosti elektrovozidel. Riziko požárů bylo popsáno v předcházející kapitole a bylo o něm pojednáváno teoreticky. Následující kapitola se zaměří na objektivní analýzu četností požárů elektrovozidel s vozidly poháněnými tradičními spalovacími motory.

Přesné statistiky týkající se požárů a hoření elektromobilů jsou často nedostupné a jen obtížně získatelné. Hasičské sbory poskytují společně s pojišťovnami určité údaje, které ovšem postrádají detailnost a jejich spolehlivost by mohla být otázkou. Navzdory tomu kapitola představí věcnou analýzu o četnosti požárů na území České republiky. Bude vytvořen komplexní pohled na problematiku, zkoumány statistiky a data, ke kterým je možné se dostat a zhodnotit se, zda s přibývajícím elektromobilitou by měl počet požárů růst nebo nikoli.

Obecně lze předpokládat, byť je situace hoření v tomto momentě sporadický incident, že s rostoucím trendem elektromobilů a zvětšováním vozového parku na elektrický pohon, bude počet požárů přibývat.

5.1 Data pojišťoven

Pojišťovny poskytují určité informace o požárech vozidel, avšak přesná čísla jsou omezená a často nedostatečně detailní. Kooperativa za poslední tři roky neřešila ani jeden požár elektromobilu, a 2 požáry hybridního vozu, což potvrzuje jejich vzácnost. Obdobně i Allianz, která uvádí, kromě 11 aut s nespecifikovaným pohonem, pouze jeden případ požáru, a to u plug-in hybridu za poslední čtyři roky [36].

Statistiku požárů vede i pojišťovna UNIQA, kde došlo k hoření 5 elektromobilů včetně hybridů. Odborníci zmiňují, že nedostatek konkrétních statistik pojišťoven může být způsoben nejen ojedinělostí těchto událostí, ale i nedostatečnou motivací pojišťoven tvořit podrobnější evidenci podobných incidentů [36].

Shrnuto, v horizontu posledních let, i s předpokladem pár jednotek případů pojišťovny Generali, mohla hořet desítka, maximálně patnáct elektrických vozidel včetně hybridů.

5.2 Data hasičů

České hasičské sbory mají k dispozici statistiky požárů a operací záchrany vozidel, avšak tyto statistiky jsou velmi nepřesné, leč systematicky vedené. Důvodem je absence kategorizace, což znamená, že není možné zjistit, jaký konkrétní typ vozidla „poháněný elektrickým motorem“ byl zapojen do příslušného incidentu [36].

Do kategorie "Osobní a dodávková silniční vozidla, jednostopá vozidla s pohonem na elektřinu" zobrazených v tabulce 5-1 jsou zahrnuty i události související s menšími elektrickými zařízeními, což značně komplikuje přesnost statistiky [36].

Tab. 5-1 Počet požárů osobních dopravních prostředků od 1. 1. 2018 do 31. 12. 2023 [38]

Dopravní prostředky osobní	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Osobní a dodávková silniční vozidla, jednostopá vozidla – hybridní	1	4	3	5	10	9
Osobní a dodávková silniční vozidla, jednostopá vozidla – na jiný pohon (např. vodík)	0	0	0	0	0	0
Osobní a dodávková silniční vozidla, jednostopá vozidla – s pohonem na benzin	873	777	748	736	835	766
Osobní a dodávková silniční vozidla, jednostopá vozidla – s pohonem na CNG	5	8	5	3	9	16
Osobní a dodávková silniční vozidla, jednostopá vozidla – s pohonem na elektřinu	3	4	10	10	21	47
Osobní a dodávková silniční vozidla, jednostopá vozidla – s pohonem na LPG	94	99	76	73	75	73
Osobní a dodávková silniční vozidla, jednostopá vozidla – s pohonem na naftu	609	640	683	754	768	813
Celkem	1585	1532	1525	1581	1718	1724

Podle dat z Ministerstva dopravy bylo k prosinci 2023 registrováno zhruba 25 500 elektricky poháněných a 31 500 hybridních vozidel. Celkem se tedy v elektromobilní kategorii vyskytuje asi 57 000 vozů [37]. Shoří-li celkem maximální počet, dle dat pojišťoven, tedy 15 elektromobilů a hybridů, roční pravděpodobnost požáru je asi 0,02 %. Z dat pojišťoven není patrné, zda se jedná o požár, který zapříčinil automobil, nebo o vůz, který podlehl ohni z jiných důvodů, žhářství nebo jiného většího neštěstí. Podle dat hasičů by se potom jednalo o celkem 56 případů, kde hovoříme o požáru o pravděpodobnostech 0,09 %, avšak velkou nepřesností do této statistiky přidává fakt, že mezi osobní dopravní prostředky na elektřinu jsou mezi jinými i elektrokoloběžky, elektrokola, elektrické skútry nebo vysokozdvizné vozíky [36]. Tuto nepřesnost zohledňuje lépe švédská studie, která má rozčlenění přesnější a lze tak posoudit vliv na výsledky a procentuální zastoupení.

Z tabulky můžeme dále vyčíst, že došlo k hašení 766 vozidel na benzínový pohon a 813 naftových vozidel. V provozu bylo k prosinci 2023 dle dat Ministerstva dopravy zhruba 6 100 000 osobních a dodávkových vozidel na naftový a benzínový pohon [37]. Z čehož vyplývá pravděpodobnost požáru asi 0,026 %, což netvoří vysoký převís mezi elektrickými a konvenčními spalovacími motory a naznačuje, že i v menším českém měřítku dochází k více požárům u automobilů se spalovacím motorem než elektrickým.

5.3 Švédská studie

Detailnější kategorizace a její vliv na celkovou statistiku dokazuje jeden z lídrů elektromobility, Švédsko, který zveřejnil informace za rok 2022 evidující na 106 požárů elektrických prostředků s nejčastějším účastníkem právě elektrokoloběžek. V posledních třech letech registrují 20 požárů elektromobilů každý rok, přestože se počet elektromobilů v provozu meziročně zdvojnásobil na 611 000. Automobilů na další paliva asi 4,4 milionů a za stejnou dobu zahořelo asi 3 400 z nich, nezávisle na paliva či žhářství. Vychází to tedy na asi 1 133 požárů ročně. To znamená, že pravděpodobnost požáru automobilu se spalovacím motorem je si 0,026 %, u vozidel na elektrický pohon je zhruba 0,004 % [39].

Tab. 5-2 Data švédského modelu [39]

Typ	Počet	Procentuálně
Celkový počet EV+hybridů	611 000	100 %
Počet požárů elektrických strojů	106	0,017 %
Z toho osobní auta	23	0,004 %
Z toho elektrokoloběžky	38	0,006 %
Z toho elektrokola	20	0,003 %
Z toho jiné zařízení	25	0,004 %

Porovnáním dat švédského modelu v tabulce 5-2 se statistikami k roku 2022 s adekvátním rozčleněním je viditelné, že automobily s fosilními palivy statisticky zahoří častěji než vozidla na plně nebo částečně elektrický pohon.

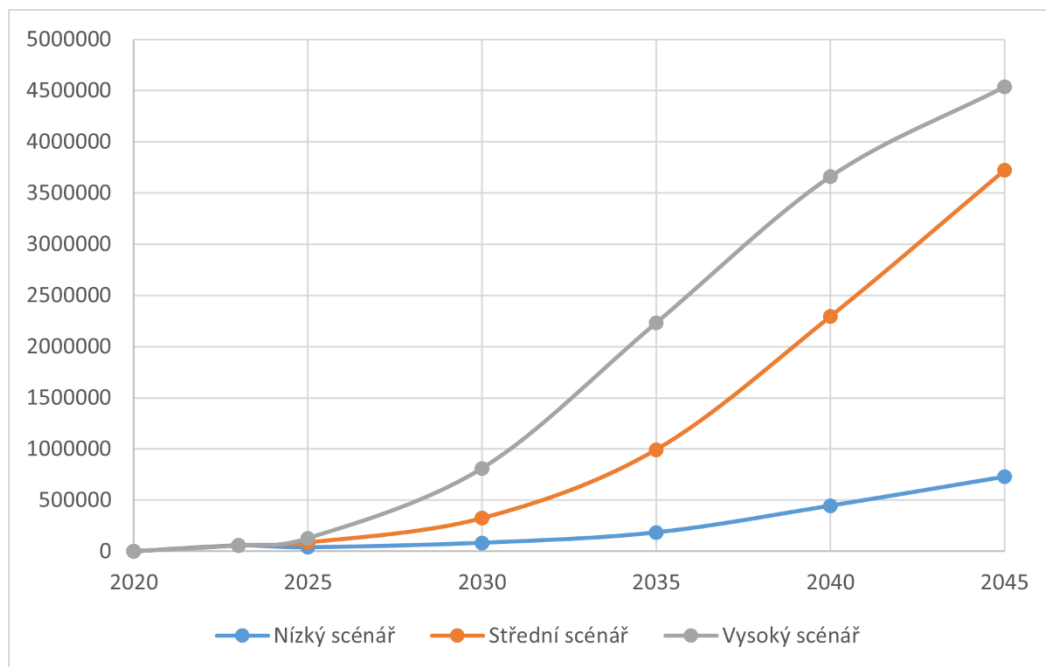
5.4 Předpokládaný vývoj na území České republiky

Právě ze Švédska by se dal vzít příklad a vytvořit jednoduchý výpočtový model, který by popisoval předpokládaný budoucí vývoj. S procentuálním zastoupením hoření elektromobilů právě na základě poměrně přesných dat ze Švédska.

Množství elektromobilů v ulicích ČR bude poté popsáno podle tří různých scénářů, na základě dat z Ministerstva průmyslu a obchodu v tabulce 5-3.

Tab. 5-3 Očekávané kumulované počty vozidel v jednotlivých časových řezech [40]

Počet EV+PHEV	2025	2030	2035	2040	2045
Nízký scénář	39 423	83 333	184 836	446 033	728 631
Střední scénář	86 685	323 420	992 719	2 293 337	3 721 136
Vysoký scénář	127 790	810 297	2 231 479	3 659 875	4 536 729



Obr. 5.1 Projekce vývoje počtů vozidel na elektrický pohon [40]

Křivky vykreslené na obrázku 6.1 simulují rychlost přechodu k elektromobilitě a jejich strmost je patrná především v šedě zobrazeném vysokém scénáři, ve kterém by se ČR mohla před rokem 2030 přiblížit Švédsku s počtem EV v provozu. Vysoký scénář dále prokazuje nejvyšší rychlost obměny kolem roku 2035, uvažuje se zde nejvyššího počtu zastoupení

elektromobilů a zároveň se zde ještě neprojevují dožívání starších EV. Následuje určité zpomalení trendu, které může být spojeno se zmíněným dožíváním starších modelů EV.

Počet požárů by tak za předpokladu určitých scénářů za využití procentuálního zastoupení z dat švédské studie vypadal následovně.

Tab. 5-4 Počty očekávaných požárů v jednotlivých časových řezech

Počet požárů EV+ PHEV	2025	2030	2035	2040	2045
Nízký scénář	2	3	7	18	29
Střední scénář	3	13	40	92	149
Vysoký scénář	5	32	89	146	181

Skutečnost, že elektromobily hoří méně často než auta s konvenčním spalovacím motorem, je zřejmá zejména ze statistických údajů švédského modelu. Otázkou však zůstává, zda procento požárů zůstane tak nízké i se stárnoucím vozovým parkem, který je v současnosti prakticky nový. Zajímavým srovnávacím faktorem by mohl být také celkový počet najetých kilometrů vozů, nejen množství registrovaných vozidel v provozu. Z něj by se dala vyvést další statistika, která by brala v zřetel i možné opotřebení vozu a množství dopravních situací, do kterých se mohly dostat. Případně by bylo i vhodné zmínit stáří vozidel, které se při požárech vyskytují, neboť se dá očekávat, že u nového auta s nejnovějšími bezpečnostními systémy a opatřeními k hoření tak snadno nedorazí.

Z dostupných informací týkajících se požárů a zásahů na našem území lze konstatovat, že i na menším vzorku elektromobilů v provozu dojde k požáru u 0,02 až 0,09 % v porovnání s 0,026 % požárů vozidel se spalovacími motory, rozdíl mezi těmito hodnotami není příliš markantní a se stále se zvětšujícím zastoupením EV v provozu by mělo docházet ke snižování jejich účasti při požárech po vzoru statistik ze Švédska. Dále by i mělo dojít ke zdokonalení a zefektivnění zásahů tak, aby se zamezilo větším poškozením nejen na vozidlu okolní majetku, ale i životního prostředí.

ZÁVĚR

Li-ion baterie jsou zkoumány jako jedna z nejslibnějších možností úložiště energie pro elektromobily. Zatím však nesplňují dokonale přísné požadavky na vysokou energetickou hustotu, životnost, vynikající bezpečnost a široký rozsah provozních teplot. Neustále jsou zkoumány vlastnosti Li-ion baterií za cílem zlepšit jejich výkon, včetně nových druhů elektrolytů, vysoce energetických a stabilních elektrodových materiálů, vysoce výkonných vodivých přísad a efektivního a bezpečného balení. Mezi těmito aspekty je elektrolyt klíčovým prvkem, přičemž současné elektrolyty se skládají zejména z lithiových solí a organických rozpouštědel. Ty způsobují nevratné ztráty kapacity, snižují životnost a teplotní rozsah, v neposlední řadě představují značné bezpečnostní riziko, zejména spojené s Thermal runaway.

Mohou se tedy vyskytnout vnitřní nebo vnější závady, které ovlivňují výkon baterie a potenciálně vést k vážným bezpečnostním problémům, jako je Thermal runaway. Ten je v oblasti Li-ion baterií významným problémem kvůli své nekontrolovatelné a nevratné povaze, která může vést k požárům a výbuchům, ohrožujícím bezpečnost veřejnosti. Pro lepší pochopení, prognózu a diagnostiku je také důležité modelování tepelného úniku. Modelování, předpověď a detekce tepelného úniku u Li-ion baterií mohou pomoci při vývoji preventivních a zmírňujících přístupů k zajištění bezpečnosti bateriového systému.

V bakalářské práci byla vypracována rešerše na typy bateriových článků používaných v elektromobilech, princip fungování nejčastěji používaného Li-ion akumulátoru, včetně stručného popisu elektrochemických reakcí při nabíjení a vybíjení akumulátorů a zhodnocení vlastností, výhody, nevýhody a konkrétní využití u několika katodových materiálů.

Dále byl rozebrán jev známý jako Thermal runaway, který tvoří hlavní bezpečnostní riziko při práci s bateriovými vozidly. Popis reakce, důvody jeho vzniku a možné způsoby, jak mu efektivně předejít, případně alespoň zmírnit jeho průběh. Diskutováno bylo také hašení hořících baterií a efektivita hasicích prostředků.

Byly popsány jednotlivá rizika vzniku požáru u elektromobilu. Byly také zmíněny konkrétní případy společně s doprovodnými projevy hoření elektromobilů rozčleněné dle druhu spouštěče požáru a popsány problémy s likvidací a krátké porovnání oproti hašení vozidel se spalovacím motorem.

Výsledky stávajících testů odhalily, že míra uvolňování tepla při požáru elektromobilu je srovnatelná s požárem vozidla poháněného fosilními palivy, zatímco požár elektromobilu může uvolňovat více toxických plynů z hořících lithium-iontových baterií.

Požár elektromobilu je těžší uhasit kvůli potenciálnímu znovuzahoření baterie a obtížím při ochlazování uvnitř bateriového obalu. Pro hašení požáru elektromobilu je stále považována voda za nejúčinnější, a pro uhašení a ochlazení baterie je zapotřebí příliš velké množství vody. Nicméně, méně hasiva může být použito, pokud je aplikováno přímo na bateriové úložiště. Navíc je velmi málo znalostí o riziku požáru vyřazených elektromobilů a vyřazených baterií. V budoucnu by měly být také vyžadovány lépe navržené protipožární systémy pro budovy a také aktualizace hasičského inventáře, který by měl korespondovat stále se zvětšujícím počtu elektromobilů na silnicích.

V poslední části proběhlo srovnání počtu elektromobilů a jejich požárů na silnicích v ČR oproti konvenčním motorovým vozidlům doprovázené predikcí pro následujících 20 let na základě dostupných odhadů Ministerstva průmyslu a obchodu. K porovnání docházelo nejen mezi elektrickými a spalovacími motory, ale i mezistátně, kde došlo k hodnocení a budoucí predikci na základě švédské studie, která se zabírala podobnou statistikou.

Ze statistik vyplývá, že provoz elektrických vozidel je bezpečnější oproti vozidlům na spalovací motor, alespoň co se týče počtu požárů na každé registrované vozidlo. Podle středního předpokládaného scénáře bychom se měli švédského počtu EV v provozu dostat mezi lety 2030 a 2035 a společně s jejich integrací do více dopravních situací a množství najetých kilometrů

by mělo docházet k celkově menšímu počtu požárů vozidel za rok a možného zpřesnění výstupních dat.

Zároveň by mělo také docházet k dalšímu vývoji v oblasti kvality používaných materiálů, méně hořlavých a reaktivních plynů, bezpečnostních senzorů a asistentů, které by také mohly předcházet nehodám nebo alespoň zmírnit závažnost, nejen ekologických, dopadů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] EVEXPERT.CZ © 2022. Elektromobily, jejich baterie a jak nabíjet. EV Expert [online]. [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://www.evexpert.cz/eshop/znalostni-centrum/elektromobily-a-jejich-baterie>
- [2] SEMCO UNIVERSITY. BATTERY SEPARATOR MATERIAL [online]. c2022 [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://semcouniversity.com/battery-separator-material/>
- [3] ŠPINA, Martin. Akumulátory a pohonné systémy elektrických vozidel - EV (1. díl). OEnergetice.cz [online]. 2021 [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektromobilita/akumulatory-a-pohonne-systemy-elektrickych-vozidel-ev-1-dil>
- [4] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony*. 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [5] TESLAFAN. NiMH akumulátory – v čem byly a jsou lepší a naopak horší než Li-Ion baterie? Teslafaň [online]. 2016 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.teslafan.cz/clanky/nimh-akumulatory-v-cem-byly-a-jsou-lepsi-a-naopak-horsi-nez-li-ion-baterie>
- [6] SEMCO UNIVERSITY. HISTORY OF LITHIUM BATTERY DEVELOPMENT [online]. c2022 [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://semcouniversity.com/history-of-lithium-battery-development/>
- [7] HOUSER, Pavel. Historie, výhody a nevýhody Li-on baterií. Sciencemag.cz [online]. 2016 [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://sciencemag.cz/historie-vyhody-a-nevyhody-li-on-baterii/>
- [8] Interkalační sloučeniny [online]. In: UNIVERZITA PARDUBICE FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ. © 2023 [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://fcht.upce.cz/fcht/slchpl/vyzkum/interkalacni.html>
- [9] TICHÝ, Jiří. Lithiové akumulátory Přehled základních typů a jejich vlastností. Tzbinfo [online]. 2019 [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [10] KANE, Mark. What Batteries Are Tesla Using In Its Electric Cars? InsideEVs [online]. 2022 [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/587455/batteries-tesla-using-electric-cars/>
- [11] NITTA, Naoki, Feixiang WU, Jung Tae LEE a Gleb YUSHIN. Li-ion battery materials: present and future. Materialstoday [online]. 2015 [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702114004118?via%3Dihub>
- [12] BATTERY UNIVERSITY. Types of Lithium-ion [online]. 2023 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [13] MSG EQUIPMENT. Which batteries is Tesla using in its models? MSGEquipment [online]. 2023 [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://servicems.eu/en/news/post/1255-Type-and-chemical-composition-of-lithium-ion-.html>
- [14] THE UNIVERSITY OF LIVERPOOL. Lithium Iron Phosphate-LiFePO₄. ChemTUBE 3D [online]. © 2008-2024 [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: https://www.chemtube3d.com/lib_lfp-2/
- [15] MARCINEK, Marek. Electrolytes for Li-ion transport – Review. Solid State Ionics [online]. 2015, 107-126 [cit. 2024-02-25]. ISSN 0167-2738. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2015.02.006>.

- [16] CARY M, Hayner, Zhao XIN a Kung HAROLD H. Materials for Rechargeable LithiumIon Batteries. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering [online]. 2012, 445-471 [cit. 2024-02-25]. ISSN 1947- 5438. Dostupné z: <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-062011-081024>
- [17] TIM, Nordh. Lithium titanate as anode material in lithiumion batteries [online]. Švédsko, 2015 [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:873630/FULLTEXT01.pdf>. Licentiate thesis. Uppsala University.
- [18] JAHN, Michal. GELOVÉ POLYMERNÍ ELEKTROLYTY PRO ELEKTROCHEMICKÉ ZDROJE PROUDU [online]. Technická 2896/2, Brno, 2022 [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: https://theses.cz/id/5rqc2d/DIZERTACNI_PRACE_Michal_Jahn.pdf. Disertace. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [19] RYBECKÝ, Vladimír. Dlouhá cesta k akumulátorům s pevným elektrolytem. Autoweek.cz [online]. 2022 [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.autoweek.cz/dlouha-cesta-k-akumulatorum-s-pevnym-elektrolytem>
- [20] Úvod pro baterie lithium ion [online]. 2017 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <http://cz.solar-led-lights.com/info/introduction-to-lithium-ion-batteries-23798174.html>
- [21] CAO, Can, Zhuo-Bin LI, Xiao-Liang WANG, Xin-Bing ZHAO a Wei-Qiang HAN. Recent advances in inorganic solid electrolytes for lithium batteries. Frontiers in Energy Research [online]. 2014, (2) [cit. 2024-02-26]. ISSN 2296- 598X. Dostupné z: doi:10.3389/fenrg.2014.00025
- [22] MARK, Juzkow. Development of a BB-2590/U rechargeable lithium-ion battery. Journal of Power Sources [online]. Elsevier, 1999, (80), 286-292 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775399001706>
- [23] BELZA, Jaroslav. Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení. In: Belza.cz [online]. 2001 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.belza.cz/charge/liion1.htm>
- [24] QI, Zhenfeng, Wanfu LIU, Wuqin QI, Xingbo LI, Peng WANG a Shiwei FANG. Analysis and research status of the cause of thermal runaway of lithium battery [online]. China, 2021, (12164) [cit. 2024-03-06]. Dostupné z: [\(PDF\) Recent Advances In Inorganic Solid Electrolytes For Lithium Batteries \(researchgate.net\)](#)
- [25] TRAN, Manh-Kien, Anosh MEVAWALLA, Attar AZIZ, Satyam PANCHAL, Yi XIE a Michael FOWLER. MDPI. A Review of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway Modeling and Diagnosis Approaches [online]. 2022 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/6/1192>
- [26] Preventing Battery Fires: Understanding the Causes of Thermal Runaway. In: RCLabs [online]. 2022 [cit. 2024-03-06]. Dostupné z: <https://rclabs.co/preventing-battery-fires-understanding-the-causes-of-thermal-runaway/>
- [27] HILL, Davion a Nick WARNER. Considerations for ESS Fire Safety. 2017, (4), 57-59.
- [28] MCKERRACHER, Rachel D., Jorge GUZMAN-GUEMEZ, Richard G. A. WILLS, Suleiman M. SHARKH a Denis KRAMER. Advances in Prevention of Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries. Advanced Energy and Sustainability Research [online]. 2021 [cit. 2024-03-06]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aesr.202000059>
- [29] Sun, P., Bisschop, R., Niu, H. et al. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. Fire Technol 56, 1361–1410 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>

- [30] KUMAR, G.K. Naveen a Akansha THAKUR. Fire In Electric Vehicles: A Review [online]. 2022 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: doi:10.1109/ONCON56984.2022.10126847
- [31] NEDĚLNÍKOVÁ, Hana et al. Statistická ročenka Hasičského záchranného sboru České republiky 2023. Online. Ministerstvo vnitra - Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky. 2024, s. 7-10. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/statisticke-rocenky-hasicskeho-zachranneho-sboru-cr.aspx> [cit. 2024-04-16]
- [32] PRUDIL, Luděk. Popis zásahu požár elektromobilu. [Online], pdf. 2024, materiál mi byl poskytnut na základě zákona 106/1999 Sb. o svobodném přístupu k informacím
- [33] Tesla Vehicle Safety Report [Online] [cit. 2024-04-16] Dostupné z: <https://www.tesla.com/VehicleSafetyReport>
- [34] GENIÁLNĚ JEDNODUCHÉ ŘEŠENÍ HOŘÍCÍCH ELEKTROMOBILŮ. HASIČI NA NĚ HODÍ SPECIÁLNÍ PLACHTU. Autobible.euro.cz [online]. 2024 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/clanky/genialne-jednoduche-reseni-horicich-elektromobilu-hasici-na-ne-hodi-specialni-deku/>
- [35] FUNK, Elena, Konrad Wilkens FLECKNOE-BROWN, Thusadh WI JESEKERE, Bjarne P. HUSTED a Blanca ANDRES. Fire extinguishment tests of electric vehicles in an open sided enclosure. Fire Safety Journal [online]. 2023 [cit. 2024-05-19]. ISSN ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103920>
- [36] ČERMÁKOVÁ, Kristýna. Jak často hoří v Česku elektromobily? Prozkoumali jsme data pojišťoven a hasičů. Obnovitelne.cz [online]. 2024 [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://www.obnovitelne.cz/clanek/2903/jak-casto-hori-v-cesku-elektromobily-prozkoumali-jsme-data-pojistoven-a-hasicu>
- [37] MINISTERSTVO DOPRAVY ČR. Statistické výstupy - výběr vozidla. Online. Registr vozidel. 15. 4. 2024. Dostupné z: <https://www.dataovozidlech.cz/vystupDK> [cit. 2024-04-15]. S nastavením výstupu registrovaných vozidel k prosinci 2023 a druhu paliva
- [38] OCHMANOVÁ, Klára. Generální ředitel Hasičského záchranného sboru ČR. [Online] 2024, [cit. 2024-05-24], materiál mi byl poskytnut na základě žádosti o poskytnutí informací
- [39] Bränder i eltransportmedel under 2022. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap [online]. 2023 [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.msb.se/sv/aktuellt/nyheter/2023/maj/brander-i-eltransportmedel-under-2022>
- [40] EUROENERGY. Aktualizace predikce vývoje elektromobility v ČR do roku 2045. Online, studie. 7. 12. 2021, s. 52-55. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2022/2/Elektromobilita_predikce-do-2045.pdf [cit. 2024-04-17]

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
Li-ion	Lithium-iontová
NCA	Katodový materiál LiNiCoAlO_2
NMC	Katodový materiál $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$
LFP	Katodový materiál LiFePO_4
GPE	Gelový elektrolyt
PMMA	Polymethylmethakrylát (akrylátové sklo)
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PEO	Polyethylenglykol
TR	Thermal runaway
BMS	Battery Management Systems
EV	Vozidlo na elektropohon
PHEV	Vozidlo s kombinovaným pohonem spalovacího a elektromotoru