

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

---

**Komplexní návrh dynamického testování  
podle předpisu EHK 100**

---

*Autor:*

Bc. Ondřej MALÍK

*Vedoucí diplomové práce:*

Ing. Vojtěch ŠTĚCH, MSc.

Ing. Josef MÍK, Ph.D.

Ústav dopravních prostředků (16116)

18. května 2020





**K616.....Ústav dopravních prostředků**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Ondřej Malík**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika**

Název tématu (česky): **Komplexní návrh dynamického testování baterií podle předpisu EHK 100**

Název tématu (anglicky): **Komplex design of battery testing according to EHK 100**

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Popište trakční baterie elektrických vozidel
- Popište stávající stav zkušební laboratoře
- Zjistěte legislativní podmínky pro testování trakčních baterií
- Popište nebezpečné aspekty při zkoušení baterií
- Navrhněte postupy před zkouškou, při zkoušce a po zkoušce z hlediska chování osob v závislosti na stavech baterie a ostatních zařízení
- Navrhněte úpravu laboratoře včetně úprav vyklizovacích prostorů, hasících prosotrů a skladovacích prostorů
- Stanovte opatření pro zvýšení bezpečnosti při zkoušení baterií



- Rozsah grafických prací: dle doporučeného rozsahu
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: EHK 100 Bateriové elektromobily  
R. Yiong, Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles  
ISO 12305-3 Electrically propelled road vehicles  
I. Buchmann, Batteries in a Portable World. 4. Edition

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vojtěch Štěch, MSc.**  
**Ing. Josef Mík, PhD.**

Datum zadání diplomové práce: **12. června 2019**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **18. května 2020**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu dopravních systémů

L. S.

doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Ondřej Malík  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 12. června 2019

## Prohlášení autora

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

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

Nemám závažný důvod proti užívání 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).

Podpis:

---

V Praze dne:

---

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Ústav dopravních prostředků (16116)

Diplomová práce

**Komplexní návrh dynamického testování podle předpisu EHK 100**

od Ondřeje MALÍKA

## *Abstrakt*

Tato diplomová práce se zaměřuje na bateriové systémy elektrických vozidel a především na testování jejich bezpečnost. Nejprve stručně popisuje elektromobilitu jako celek se zaměřením na jednotlivé typy elektrických vozidel. Práce se následně podrobněji věnuje jednotlivým typům bateriových systémů, jejich struktuře a fungování. Dále je rozebrána problematika schvalování baterií elektrických vozidel, kde je zacíleno na zkoušku mechanickým nárazem. Na konci teoretické části jsou popsána rizika, která hrozí při zkoušení baterií. V praktické části je navrhnut proces zkoušení baterií podle předpisu EHK č. 100 spolu s opatřeními, která jsou nutná pro zajištění bezpečnosti.

**Klíčová slova:** bateriové systémy, bezpečnost baterií, EHK/ECE 100, elektrická vozidla, elektromobilita, Li-ion baterie, mechanický náraz, rizika baterií, schvalování baterií.

## *Abstract*

This master thesis focuses on battery systems of electric vehicles and especially on their safety. First, it briefly describes electromobility as a whole, focusing on individual types of electric vehicles. The work then deals in more detail with individual types of battery systems, their structure and operation. Furthermore, the issue of approving batteries of electric vehicles is discussed, where it is aimed at the mechanical impact test. At the end of their theoretical part, the risks that occur when testing batteries are described. In the practical part, the testing process is proposed together with the measures that are necessary to ensure safety.

**Keywords:** battery systems, safety of batteries, EHK/ECE 100, electric vehicles, electromobility, Li-ion batteries, mechanical shock, battery risks, battery approval.

## *Poděkování*

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak panu Ing. Vojtěchu Štěchovi, MSc. a panu Ing. Josefu Míkovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultování diplomové práce a za rady, které mi poskytovali po celou dobu mého studia.

Velký dík patří také společnosti TÜV SÜD Czech za zkušenosti a podklady k této práci a mé rodině za podporu a trpělivost během mého studia.

# Obsah

<b>Prohlášení autora</b>	<b>iii</b>
<b>Abstrakt</b>	<b>iv</b>
<b>Poděkování</b>	<b>vi</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Elektromobilita</b>	<b>3</b>
2.1 Historie . . . . .	3
2.2 Aktuální situace . . . . .	4
2.3 Elektrické vozidlo . . . . .	5
2.3.1 PEV . . . . .	5
2.3.2 HEV . . . . .	6
2.3.3 FEV . . . . .	7
2.3.4 Jízdní odpory EV . . . . .	7
<b>3 Bateriové systémy elektrických vozidel</b>	<b>11</b>
3.1 Požadavky na bateriové systémy . . . . .	11
3.1.1 Dojezd na jedno nabití . . . . .	12
3.1.2 Míra zrychlení . . . . .	16
3.1.3 Maximální rychlost . . . . .	16
3.2 Typy bateriových systémů . . . . .	17
3.2.1 Olověné baterie . . . . .	17
3.2.2 NiMH baterie . . . . .	18
3.2.3 Lithiové baterie . . . . .	19
Složení a konstrukce Li-ion baterií . . . . .	20



Bezpečnostní prvky Li-ion baterií . . . . .	21
<b>4 Schvalování vozidel</b>	<b>23</b>
4.1 Předpisy Evropské hospodářské komise EHK . . . . .	23
4.2 Zkoušky EHK OSN č. 100 . . . . .	24
4.2.1 Mechanický náraz . . . . .	31
Ukázka protokolu ze zkoušky . . . . .	31
<b>5 Rizika při testech baterií</b>	<b>33</b>
5.1 Typické havárie baterií při testování . . . . .	34
5.1.1 Fyzické poškození . . . . .	34
5.1.2 Tepelné havárie . . . . .	35
5.1.3 Selhání při nabíjení a vybíjení . . . . .	37
5.2 Řízené podpálení baterií . . . . .	37
5.3 Rizika při manipulaci s baterií . . . . .	40
<b>6 Projekt</b>	<b>41</b>
6.1 Cíle a předpoklady projektu . . . . .	41
6.2 Projektový tým . . . . .	42
6.3 Stávající stav laboratoře . . . . .	42
6.3.1 DYCOT . . . . .	42
6.3.2 Vybavení laboratoře . . . . .	43
6.3.3 Rozložení laboratoře . . . . .	44
6.3.4 Další součásti komplexu . . . . .	44
6.4 Vývoj konceptu . . . . .	45
6.4.1 Analýza trhu baterií . . . . .	46
6.4.2 Požadavky na zkušební zařízení . . . . .	47
6.4.3 Popis navrhovaného boxu . . . . .	48
Pracovní varianty návrhů . . . . .	48
6.4.4 Mechanismus . . . . .	50
6.4.5 Analýza rizik . . . . .	50
6.5 Průběh zkoušky . . . . .	52
6.5.1 Procesy před zkouškou . . . . .	52

6.5.2	Průběh samotné zkoušky . . . . .	58
	Senzorická opatření . . . . .	58
	Měřené veličiny . . . . .	59
6.5.3	Procesy po zkoušce . . . . .	60
	Popis evakuačních scénářů . . . . .	60
	Standardní scénář evakuace . . . . .	61
	Scénář hašení ve venkovních prostorech . . . . .	62
	Scénář hašení ve vnitřních prostorech . . . . .	62
	Karanténní kontejner . . . . .	62
	Skladování po zkoušce . . . . .	63
	Procesy prováděné jen v případě požáru . . . . .	63
6.5.4	Elektrická bezpečnost . . . . .	63
	Bezpečnost při přípravě baterie . . . . .	64
6.5.5	Hasiči . . . . .	64
	Hasicí postup . . . . .	64
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>65</b>

# Seznam obrázků

2.1	První elektromobil v ČR . . . . .	4
2.2	Hustota energie v různých látkách [6] . . . . .	6
2.3	Síly působící na vozidlo . . . . .	8
3.1	Graf závislosti rychlosti na čase v cyklu UDDS a HWFET . . . . .	12
3.2	Graf závislosti rychlosti na čase v cyklu NEDC . . . . .	13
3.3	Graf závislosti rychlosti na čase v cyklu 10.15 Mode . . . . .	13
3.4	Graf závislosti rychlosti na čase v cyklu WLTP [13] . . . . .	15
3.5	Schéma olověné baterie [15] . . . . .	17
3.6	Schéma NiMH baterie [15] . . . . .	18
3.7	Schéma přenosu energie Li-ion baterie . . . . .	19
3.8	Schéma Li-ion baterie [22] . . . . .	20
3.9	Konstrukce battery packu - Audi e-tron . . . . .	21
4.1	Klimatická komora . . . . .	26
4.2	Zatěžovací deska . . . . .	26
4.3	Přímé vystavení plamenu . . . . .	27
4.4	Všeobecný popis zkušebních impulsů . . . . .	32
4.5	Zrychlení v jednotlivých časových okamžicích . . . . .	32
5.1	Ukázka reakce baterie po poškození [29] . . . . .	33
5.2	Proces zahřívání bateriových článků [24] . . . . .	36
5.3	Hoření kompletní a odkrytované baterie [30] . . . . .	38
5.4	Závislost teploty na čase při zkoušce baterie s krytem [30] . . . . .	38
5.5	Závislost teploty na čase při zkoušce baterie bez krytu [30] . . . . .	39
6.1	Výkres rozložení zkušebny DYCOT . . . . .	44

6.2	DYCOT - Skelet karoserie při dynamickém pulzu [32] . . . . .	45
6.3	Nissan Leaf, VW e-Golf, Tesla Model S . . . . .	47
6.4	BMW i3, BMW i8, Škoda VisionE . . . . .	47
6.5	Navrhovaný box [33] . . . . .	50
6.6	Detail západek [33] . . . . .	50
6.7	Analýza rizik . . . . .	51
6.8	Situace umístění hasičské jednotky a evakuační zóny . . . . .	54
6.9	Lokální rozmístění detektorů . . . . .	56
6.10	Elektroizolační rohož . . . . .	57
6.11	Rozhodovací křivky pro zaplavování boxu . . . . .	60
6.12	Trajektorie jízdy vysokozdvizného vozíku při evakuaci . . . . .	61
6.13	Karanténní kontejner . . . . .	62

# Seznam tabulek

3.1	Data . . . . .	14
3.2	Energie odpovídající 5 jízdám . . . . .	15
3.3	Dojezd na jedno dobíjení odpovídající 5 jízdám . . . . .	15

# Seznam symbolů

Označení	Název	Jednotka
$a$	zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$E_k$	kinetická energie	J
$F$	síla	N
$F_c$	odpor stoupání	N
$F_d$	aerodynamický odpor	N
$F_g$	gravitační síla	N
$F_L$	celkový jízdní odpor	N
$F_r$	valivý odpor	N
$g$	gravitační zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$M$	hmotnost	kg
$t$	čas	s
$v$	rychlost	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$v_w$	rychlost vzduchu	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\rho$	hustota vzduchu	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

# Seznam použitých zkratek

<b>BMS</b>	<b>B</b> attery <b>M</b> anagement <b>S</b> ystem
<b>DYCOT</b>	<b>D</b> Ynamic <b>C</b> OMponent <b>T</b> esting
<b>EV</b>	<b>E</b> lectric <b>V</b> ehicle
<b>FEV</b>	<b>F</b> ull- <b>C</b> ell <b>E</b> lectric <b>V</b> ehicle
<b>FHDS</b>	<b>F</b> ederal <b>H</b> ighway <b>D</b> riving <b>S</b> chedule
<b>HEV</b>	<b>H</b> ybrid <b>E</b> lectric <b>V</b> ehicle
<b>ICEV</b>	<b>I</b> nternal <b>C</b> ombustion <b>E</b> ngine <b>V</b> ehicle
<b>PEV</b>	<b>P</b> ure <b>E</b> lectric <b>V</b> ehicle
<b>SOC</b>	<b>S</b> tate <b>O</b> f <b>C</b> harge
<b>UDDS</b>	<b>U</b> rban <b>D</b> ynamometer <b>D</b> riving <b>S</b> chedule
<b>UNECE</b>	<b>U</b> nited <b>N</b> ations <b>E</b> conomic <b>C</b> ommission for <b>E</b> urope

# Kapitola 1

## Úvod

Dopravní prostředky nesporně zatěžují životní prostředí, ať už procesy při jejich výrobě či provozu. Pokud se zaměříme na jejich provozování, zejména spalovací motory výrazně znečišťují ovzduší oxidem uhličitým, oxidy dusíku a mnoha dalšími látkami. Z tohoto důvodu je v posledních letech kladen velký důraz na omezení vypouštění exhalací vozidel.

Zážehové a vznětové motory jsou tak postupně nahrazovány alternativními palivy jako jsou LPG, CNG, elektrická energie z bateriových článků nebo z kyslíko-vodíkových článků. Tato práce se bude zaměřovat hlavně na energii z bateriových článků na bázi lithia, které jsou sestaveny do bateriových systémů pro pohon čistě elektrických vozidel nebo hybridních vozidel.

Provozování bateriových systémů s sebou přináší celou řadu bezpečnostních rizik, proto před uvedením bateriových systémů do provozu je nutné ověřit jejich bezpečnost a funkčnost. To zajišťuje série zkoušek, kterým je baterie podrobena. Pokud bateriový systém splní požadavky všech zkoušek, může dojít k jeho homologaci a následnému uvedení na trh.

Hlavním cílem této práce je implementace provádění zkoušky mechanického nárazu do laboratoře DYCOT. V laboratoři firmy TÜV SÜD Czech se simulace dynamických nárazů již probíhají, ale testování baterií doposud nebylo prováděno. Proto je nutné analyzovat všechna rizika spojená s dynamickým zatěžováním bateriových systémů elektrických vozidel a následně navrhnout takové postupy, bezpečnostní opatření a procesy, které zajistí bezpečnost v celém průběhu testování. Zároveň je potřebné zajistit, aby byl průběh zkoušky



v souladu s veškerou zkušební legislativou.

Pro zorientování se v problematice bude nejprve analyzována současná situace okolo elektromobility a také budou rozebrány typy vozidel, které využívají lithiové trakční baterie. Dále budou popsány obecné požadavky na bateriové systémy, důraz bude kladen také na typy bateriových systémů, jejich fungování a stavbu. Aby bylo možné provést návrh všech procesů, je nutné znát platnou legislativu, proto bude součástí teoretické části práce i rešerše předpisů Evropské hospodářské komise.

Dynamické testování baterií doprovází celá řada problémů a rizik. Jednou z nejpálčivějších hrozeb je potenciální vznik požáru, který může mít vysokou intenzitu a teploty přesahující  $1000^{\circ}\text{C}$ . Proto se jedna z kapitol bude soustředit na rozbor požárů baterií, které byly studovány v odborných člancích a byly konzultovány s odborníky na bateriové systémy a výzkumnými pracovníky ústavu požární ochrany.

V praktické části této práce bude popsán projekt, ve kterém jsem řešil bezpečnost, proces testování a zázemí. Na základě mých analýz jsme společně s projektovým týmem navrhli koncept mechanismu, ve kterém bude umístěna baterie při testu, a sensoriku pro monitorování baterie. Bude navržen proces zkoušky a scénáře hašení baterie, dále také bezpečnostní prvky pro zajištění bezpečnosti všech osob a zabezpečení laboratoře. Všechna navrhovaná opatření jsem konzultoval s odborníky na danou problematiku a na základě toho jsem optimalizoval daná řešení.

## Kapitola 2

# Elektromobilita

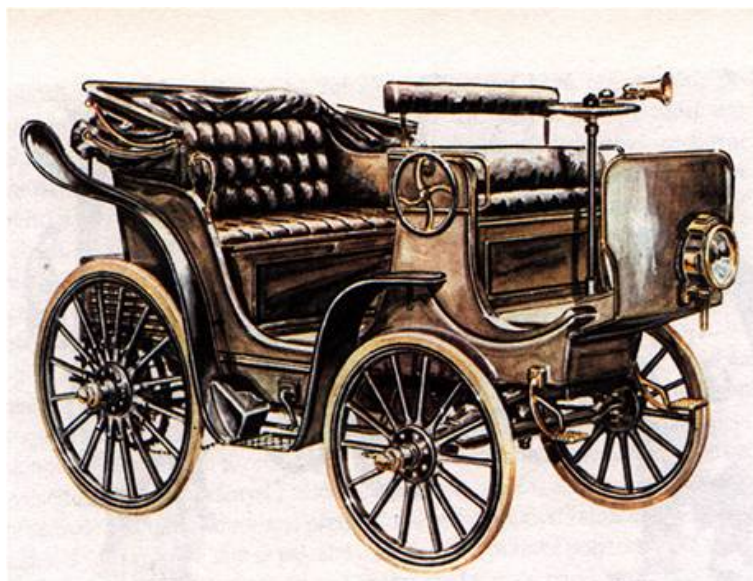
### 2.1 Historie

Od počátku automobilismu elektromobily konkurovaly vozidlům poháněným spalovacím motorem. A to zejména díky svému snadnému spuštění do provozu, tichému chodu, jednoduché konstrukci a nezatížení ovzduší exhalacemi.

Jedním z prvních významných konstruktérů, kteří se zabývali především stavbou elektromobilů, byl Francouz H. Krieger, který působil v 80. letech 19. století. Jeho zásluhou bylo, že v Paříži jezdily elektrické drožky, což jsou otevřené vozy, které byly dříve taženy koňmi. Nejvýznamnější vůz byl vybaven dvěma elektromotory, které poháněly každý jedno kolo [1].

Na území dnešní České republiky byl postaven první elektrický vůz v roce 1895 elektrotechnikem Ing. Františkem Křížkem. Jeho dvoumístný vůz na obrázku 2.1 byl osazen stejnosměrným elektromotorem o výkonu 3 kW. Ten poháněl tuhou zadní nápravu s diferenciálem pomocí redukčního ozubeného převodu. Energetické úložiště poskytovalo 42 olověných akumulátorů, které byly uloženy nad zadní nápravou [1].

V roce 1896 začíná první sériová výroba elektromobilů, kterou uvedla do provozu rakouská firma J. Lohner. U počátků této výroby byla i velká osobnost automobilového průmyslu, Ferdinand Porsche. Ten stál za úplně prvním prototypem hybridního vozidla, které bylo sestaveno především z důvodů dosažení vyššího dojezdu. Jeho systém *Mixte* kombinoval benzínový motor a dynamo, to dodávalo proud elektromotorům uloženým v nábojích kol. V době obou zmíněných vynálezců se od elektrického pohonu upustilo kvůli špatné efektivitě oproti spalovacím motorům. Elektromobilita opět začala být populární až nyní zejména z důvodu snahy o snížení znečištění ovzduší [1].



OBRÁZEK 2.1: První elektromobil v ČR

## 2.2 Aktuální situace

V současné době se klade velký důraz na energetickou udržitelnost a environmentální problémy, proto dochází k adaptování vozidel založených na alternativních pohonech. Tyto pohony mají podle vlád evropských zemí snížit závislost na fosilních palivech a snížit emisi skleníkových plynů [2].

Od roku 2021 budou platit nové limity pro osobní automobily a dodávky. Nově bude maximální povolená spotřeba 4.1 l na 100 km pro benzínové agregáty a 3.6 l na 100 km pro naftové pohonné jednotky. V roce 2030 nastane další zpřísnění pravidel o 37.5% [3].

Spousta zemí, převážně z Evropy, udělala agresivní kroky k podpoře elektrických vozidel. France a Spojené království Velké Británie a Severního Irska oznámily plán na zastavení prodeje vozidel poháněných benzínem nebo naftou od roku 2040. Norsko, které patří k nejprogresivnějším státům a má nejvyšší počet EV na světě, má nastavený cíl do roku 2025, v tomto roce chce prodávat nové vozy pouze PEV a PHEV. Holandsko má v plánu od roku 2025 zakázat diesellové a benzínové automobily. Německo přijalo usnesení požadující zákaz spalovacích motorů do roku 2030. A dokonce i Čína má plány na vyřazení fosilních paliv. Všechna tato usnesení jasně směřují vývoj elektromobility a jiných alternativních pohonů kupředu [4].

## 2.3 Elektrické vozidlo

V této kapitole budou hlouběji popsány jednotlivé typy EV. Jako každé vozidlo i to elektrické musí překonat odporové síly, přesněji jízdní odpory, proto budou v této kapitole popsány také. Tři hlavní typy EV jsou tyto:

- PEV - Pure Electric Vehicle,
- HEV - Hybrid Electric Vehicle,
- FEV - Full-Cell Electric Vehicle [5].

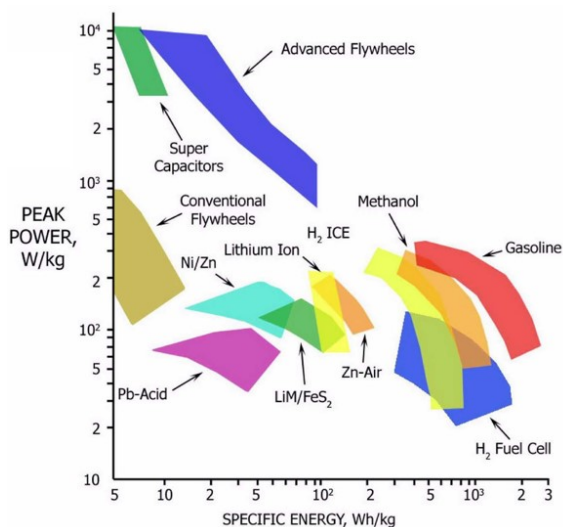
### 2.3.1 PEV

Čistě elektrická vozidla jsou taková vozidla, která zanechávají na dopravních komunikacích nulové emise škodlivých plynů během provozu. Důležitou vlastností pro PEV vozidla jsou také minimální celkové emise - zde zohledňujeme také emise, které jsou vytvářeny při generování elektrické energie v elektrárnách. Pro vozidla PEV je největší výzvou omezený dojezd, vysoké počáteční náklady a infrastruktura pro nabíjení.

V současnosti systém PEV spoléhá na využití baterií, které jsou použity jako jediné nebo hlavní zařízení pro ukládání elektřiny. To je důvod, proč jsou někdy PEV nazývány jako *battery electric vehicle* tedy BEV.

Průměrný dojezd PEV na jedno dobíjení u nejvyšších modelů přesahuje i 500 km, oproti tomu dojezd vozidlem s klasickým spalovacím motorem (ICEV) často přesahuje 1000 km. Aktuálně jediným možným řešením této nevýhody oproti vozidlům se spalovacími motory je zvýšení kapacity baterií. To je možné buď zvýšením počtu článků nebo zvýšením elektrické hustoty, ta je v porovnání s ostatními pohonnými látkami na obrázku 2.2.

Na rozdíl od ICEV vyžadují PEV čas na nabíjení. Tento čas je závislý na specifikacích nabíjecí infrastruktury. Pokud soustava poskytuje napětí 110-240 V, proud 13-40 A, výkon 2-4 kW, tak se doba dobíjení pohybuje mezi 5 a 8 hodinami v závislosti na velikosti baterie. Tato doba nabíjení je příliš dlouhá pro zajištění průběžného provozu. Když budeme uvažovat *rychlónabíječku*, která má vyšší nároky na infrastrukturu a požaduje napětí 200-400 V, proud 100-200 A, výkon 50 kW, můžeme docílit nabití na 80% kapacity za pouhých 20 až 30 minut



OBRÁZEK 2.2: Hustota energie v různých látkách [6]

[5]. Doba tankování ICEV se pohybuje jen v řádech jednotek minut.

Dalším řešením zajištění průběžného provozu by mohla být výměna celé bateriové sestavy. Tato výměna by zabrala jen několik minut, ale bylo by nutné sjednocení baterií všech výrobců. Pro tyto účely by bylo potřebné vybudovat soustavu *výměnných stanic*, kam by vozidlo s vybitými bateriemi přijelo. Zde by byla vyňata vybitá baterie a následně osazena baterie nabitá [5].

### 2.3.2 HEV

Hybridní elektrická vozidla jsou taková vozidla, jejichž pohon je složen z minimálně dvou zdrojů energie. Nejčastěji se jedná o kombinaci elektromotoru a spalovacího motoru.

Pro efektivní fungování hybridního vozidla je nutná řada funkcí, mezi ty nejdůležitější patří například systém *start-stop*, který je důležitý zejména kvůli úspoře paliva v intravilánu. Další nepostradatelnou funkcí je dobíjení baterie při deceleraci nebo při brzdění.

HEV může díky svým vlastnostem konkurovat ICEV v délkách dojezdu. Ovšem z jeho vlastností také vyplývá nevýhoda oproti PEV, kterou je nenulová emisivita.

*Hybridní pohony můžeme rozdělit do následujících kategorií:*

- Plug-in Hybrid - vozidlo je poháněno primárně elektromotorem, spalovací motor je aktivován až při vyčerpání kapacity baterií.

- Full Hybrid - při nižších rychlostech pracuje výhradně elektromotor, spalovací motor je využit při rychlostech vyšších; Full Hybrid není možné dobít ze sítě, baterie se dobíjejí spuštěním spalovacího motoru; nejznámějším příkladem je Toyota Prius.
- Mild Hybrid - dominantním pohonem je spalovací agregát; elektromotor funguje jen jako podpora spalovacímu motoru a není možné, aby běžel samostatně [5] [7].

### 2.3.3 FEV

FEV je poháněn elektromotorem, ale zdrojem jeho energie je vodík, který se následně přeměňuje v energii elektrickou. FEV má nulové provozní emise a velmi nízké celkové emise. Navíc může nabídnout srovnatelné dojezdové vzdálenosti jako ICEV. Jeho největší výzvou je snížení pořizovacích nákladů a nedostatečná infrastruktura čerpacích stanic na vodík.

Je možné uvažovat o třech typech **vodíkových čerpacích stanic**:

- CHG - Stlačený vodíkový plyn
- LH - Kapalný vodík
- MH - Metal hydride

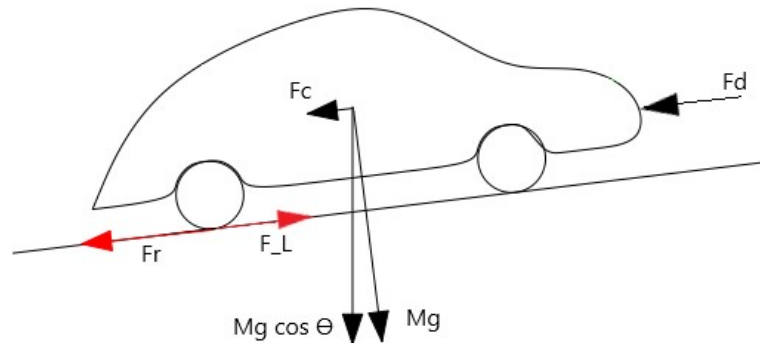
Pokud by bylo implementováno CHG, musel by být vodík skladován při tlaku kolem 250 bar a znamenalo by to velmi vysoké náklady na nádrže a jejich zabezpečení.

V případě implementace LH by bylo pro infrastrukturu velice náročné vytvoření podmínek, protože kapalný vodík vyžaduje skladování při teplotě okolo  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Proto by bylo nutné využít kryogenní skladovací technologie.

Pro možnost využití technologie MH by bylo potřebné vybudovat infrastrukturu, díky které by mohlo docházet k mechanické výměně MH podobně jako je popsáno u výměny baterií v odstavci PEV [5].

### 2.3.4 Jízdní odpory EV

V závislosti na typu EV může být pohon a energie EV nahrazena plně nebo částečně elektromotory, které jsou v něm umístěny. Stejně jako ICEV musí pohonná jednotka v PEV poskytnout sílu na uvedení vozidla do pohybu. Síla, kterou musí vozidlo překonat, aby se



OBRÁZEK 2.3: Síly působící na vozidlo

začalo pohybovat, je známá jako jízdní odpor. **Jízdní odpor**  $F_L$  se skládá z dílčích odporů, nejvýznamnější jsou zakresleny na obrázku 2.3 a jsou následující:

- aerodynamický odpor  $F_d$ ,
- valivý odpor  $F_r$ ,
- odpor stoupání  $F_c$  [8].

Pro jízdní odpory platí následující vztah:

$$F_L = F_d + F_r + F_c \quad (2.1)$$

**Aerodynamický odpor**  $F_d$  je tažná síla, která je dána třením pohybujícího se vozidla s okolním vzduchem. Toto tření je dáno vztahem:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_d \cdot (V - V_w)^2, \quad (2.2)$$

kde  $\rho$  je hustota vzduchu,  $A$  je čelní plocha vozidla,  $C_d$  je součinitel odporu vzduchu,  $V$  je rychlost vozidla a  $V_w$  je rychlost vzduchu v opačném směru než je pohyb vozidla [9].

**Valivý odpor**  $F_r$  je závislý na deformaci pneumatik a deformaci povrchu vozovky. Dominantním prvkem valivého odporu je deformace pneumatik, protože deformace

povrchu vozovky je obecně zanedbatelná. Obecný vztah pro valivý odpor je:

$$F_r = M \cdot g \cdot C_{rr} \cdot \cos\theta, \quad (2.3)$$

kde  $\theta$  je úhel stoupání,  $M$  je celková hmotnost vozidla,  $g$  je gravitační zrychlení a  $C_{rr}$  je koeficient valivého odporu [8].

**Odpor stoupání**  $F_c$  je síla, která je vyvolána vždy, pokud se vozidlo nepohybuje po absolutní rovině. Je dán složkou gravitační síly, která působí v rovině pohybu vozidla.

$$F_c = M \cdot g \cdot \sin\theta. \quad (2.4)$$

Pokud využijeme 2. Newtonův zákon, tak zrychlení vozidla je určeno výslednicí všech sil, které působí na vozidlo [10]. Toto zrychlení vozidla  $a$  můžeme vyjádřit:

$$a = \frac{F_t - F_L}{k_t \cdot M}, \quad (2.5)$$

kde  $F_t$  je součet všech sil, které působí ve směru jízdy vozidla, a říkáme jí výsledná trakční síla,  $F_L$  je vypočítán ze vztahu 2.1 a jedná se o celkový jízdní odpor,  $k_t$  je hmotnostní faktor, který převádí rotační setrvačnost rotujících komponent na ekvivalentní translační hmotnost. Pokud ze vztahu pro zrychlení 2.5 vyjádříme výslednou trakční sílu, dostaneme vztah:

$$F_t = k_t \cdot M \cdot a + F_d + F_r + F_c. \quad (2.6)$$

Výkon  $P_t$  je závislý na rychlosti vozidla  $V$  a můžeme ho spočítat jako

$$P_t = F_t V = k_t M a V + F_d V + F_r V + F_c V. \quad (2.7)$$

Stejným způsobem můžeme vypočítat energii  $E_t$  potřebnou k pohybu vozidla na určitou vzdálenost s počátečním časem  $t_0$  a konečným časem  $t$

$$E_t = \int_{t_0}^t P_t dt. \quad (2.8)$$



Energie závisí na výsledné trakční síle  $F_t$ , ta se chováním vozidla může dostat do tří jízdních módů:

- **Trakční mód.**  $F_t > 0$ , trakční síla je větší než jízdní odpory a dochází ke zrychlování.
- **Mód brzdění.**  $F_t < 0$ , kinetická energie vozidla je disipována brzděním nebo regenerativním brzděním.
- **Volnoběžný mód.**  $F_t = 0$ , pohonný systém vozidla je zastaven, veškerá kinetická energie je spotřebována na pokrytí ztrát odporu.

## Kapitola 3

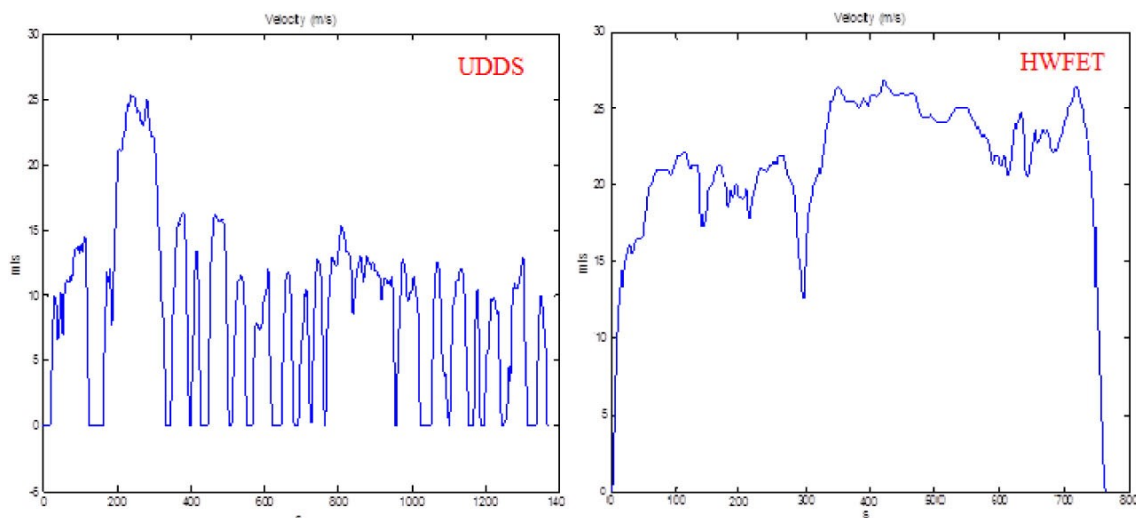
# Bateriové systémy elektrických vozidel

Bateriové systémy jsou základním a nejdražším stavebním kamenem každého EV. V následujících odstavcích budou podrobně rozebrány požadavky, které jsou na ně kladeny, druhy baterií, chemické procesy a konstrukce.

### 3.1 Požadavky na bateriové systémy

Tři hlavní parametry, které se obvykle používají k určení výkonnosti EV, jsou:

- *Dojezd na jedno nabití.* Tím se myslí ujetá vzdálenost, které je EV schopné dosáhnout při vyčerpání celé kapacity trakční baterie. Tato vzdálenost se může měnit v závislosti na podmínkách používání. Může se určovat např. při konstantní rychlosti, na různých typech komunikací, při použití různých jízdních cyklů nebo při jízdě ve městě a na dálnici. Pro příklad můžeme uvést, že to samé vozidlo má dojezd 250 km na jedno dobíjení při konstantní rychlosti  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  nebo má dojezd 170 km na jedno dobíjení při měření novým Evropským jízdním kombinovaným cyklem NEDC.
- *Míra zrychlení.* Tím se běžně myslí časový okamžik, při kterém dokáže vozidlo zrychlit z  $0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  na  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Cílová rychlost se může měnit v závislosti na schopnostech daného vozidla.
- *Maximální rychlost.* Jedná se o maximální bezpečnou rychlost, kterou se vozidlo může pohybovat. To ovšem neznamená limitní rychlost, kterou můžeme dosáhnout na veřejné komunikaci, ale rychlost, která indikuje výkonnost vozidla [11].



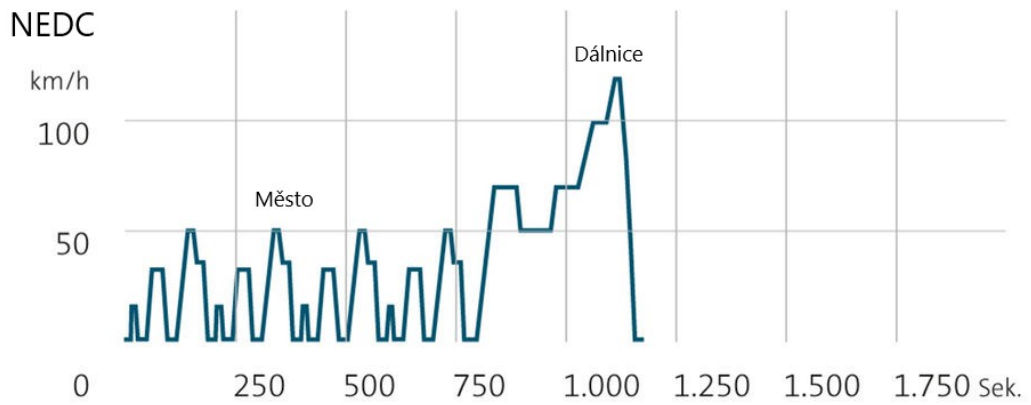
OBRÁZEK 3.1: Graf závislosti rychlosti na čase v cyklu UDDS a HWFET

### 3.1.1 Dojezd na jedno nabití

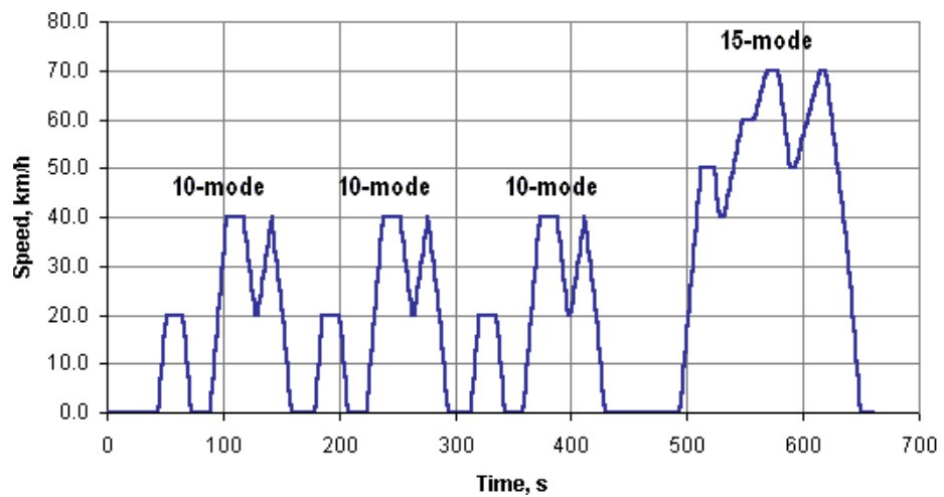
Standardní jízdní cykly jsou normálně používány na ohodnocení dojezdů pro EV v různých regionech a různých zemích.

**V USA** je nejpoužívanější jízdní cyklus *UDDS* (Urban Dynamometr Driving Schedule). Původně byl vyvinut pro hodnocení emisí  $NO_x$  pro ICEV. Následně byl UDDS používán také jako ekonomický ukazatel v městském provozu. Oproti tomu *FHDS* (Federal Highway Driving Schedule) někdy také nazýván HWFET (Highway Fuel Economy Test) byl vytvořen jako obraz provozu v hornatých nebo venkovských oblastech [8]. Oba jízdní cykly používané v Severní Americe jsou zobrazeny na obrázku 3.1.

**V Evropě** byl prvním jízdním cyklem *ECE-15*, který korespondoval s nařízením UNECE č. 15 z roku 1969. Tento cyklus byl vyvinut pro reprezentování jízdy v městském provozu a je charakterizován nízkou jízdní rychlostí. Další dříve používaný jízdní cyklus *EUDC* je vyhrazen pro agresivnější jízdu při vyšších rychlostech. Dlouhá léta byl v Evropě používán jízdní cyklus *NEDC* na obrázku 3.2 se skládá ze čtyř opakování cyklu *ECE-15* a jednoho opakování cyklu *EUDC*. Původně byl určen pro výpočet spotřeby paliva a pro určení množství vypouštěných exhalací u ICEV. Poté byl tento cyklus používán i pro určení dojezdu a spotřeby energie u EV [8].



OBRÁZEK 3.2: Graf závislosti rychlosti na čase v cyklu NEDC



OBRÁZEK 3.3: Graf závislosti rychlosti na čase v cyklu 10.15 Mode

TABULKA 3.1: Parametry typického PEV

Hmotnost, $M$	1360 kg
Faktor hmotnosti, $k_t$	1.05
Akcelerace	$2.68 \text{ m.s}^{-2}$
Koeficient valivého odporu, $C_{rr}$	0.01
Hustota vzduchu, $\rho$	$1.225 \text{ kg.m}^{-3}$
Čelní plocha vozidla, $A$	$2 \text{ m}^2$
Aerodynamický koeficient, $C_d$	0.5
Rychlost větru, $V_w$	$0 \text{ m.s}^{-1}$
Sklon vozovky, $\theta$	$0^\circ$

V Japonsku byl vytvořen cyklus *10.15 Mode* - obrázek 3.3, který reflektoval metropolitní jízdní podmínky stejně dobře jako podmínky na rychlostních komunikacích. Byl založen na studiích, které byly provedeny v Tokiu [12].

Rui Xiang ve své knize *Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles* vypočítal ujetou vzdálenost pro standardizované jízdní cykly. A to z důvodu, aby bylo možné jednotlivé cykly porovnat. Aby mohl k tomuto výsledku dojít, musel nejdříve pro své výpočty předpokládat parametry typického PEV, ty jsou vyjádřeny v tabulce 3.1 [8]. Dále bylo v této knize uvažováno, že veškerá energie baterie se promění na kinetickou energii, všechny ostatní ztráty jsou zanedbány.

Použitím vzorce 2.7 došlo k převedení grafů 3.1 až 3.3 na grafy závislosti trakčního výkonu na čase. V tuto chvíli byl využit vzorec 2.8, kde došlo k integraci výkonu  $P_t$  podle času  $t$ . Každému ze zkoumaných jízdních cyklů tak byla vypočítána energie potřebná na provedení právě jednoho odpovídajícího cyklu viz 3.2.

Výsledné porovnání je vidět v tabulce 3.3, kde jsou přepočteny ujeté vzdálenosti z jízdních cyklů na dosažitelnou vzdálenost na jedno nabití. Předpokládá se, že baterie má kapacitu 24 kWh. V této tabulce můžeme vidět, jak každý jízdní cyklus přináší rozdílné výsledky. Standardizovaný jízdní cyklus *ECE-15* má podle výpočtů dojezd 140 km - nejmenší výsledek a jízdní cyklus *10.15 Mode* má podle výpočtů dojezd 218 km - nejvyšší dojezd. Rozdíl je tedy 78 km což znamená rozdíl 36 % [8].

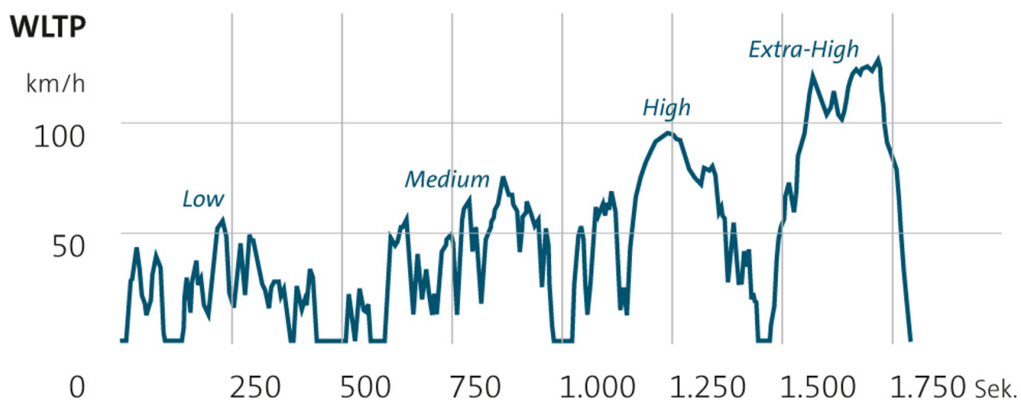
TABULKA 3.2: Energie odpovídající 5 jízdám cyklům

	UDDS	FHDS	ECE-15	NEDC	10.15
Ujetá vzdálenost za standardní cyklus [km]	11.99	16.51	0.99	10.93	4.17
Energie potřebná na standardní cyklus [kWh]	1.42	2.20	0.17	1.40	0.46

TABULKA 3.3: Dojezd na jedno dobití odpovídající 5 jízdám cyklům

	UDDS	FHDS	ECE-15	NEDC	10.15
Ujetá vzdálenost na jedno dobití [km]	202	180	140	187	218

**WLTP** V důsledku velkých rozdílů mezi jízdami zkouškami, které byly v různých místech světa používány, byl vytvořen celosvětový testovací standard WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure). Tento cyklus je primárně zaměřen na měření spotřeby paliva a emisí, ale využívá se i k určení dojezdu na jedno dobití. WLTP bere v úvahu různé situace v silničním provozu, různou rychlost, a také varianty výbavy a hmotnostní třídy automobilů. Díky tomu jeho výsledky daleko více reprezentují skutečnost. Od roku 2017 musí být spotřeba u všech nově schválených osobních automobilů uváděna podle standardu WLTP [13].



OBRÁZEK 3.4: Graf závislosti rychlosti na čase v cyklu WLTP [13]

### 3.1.2 Míra zrychlení

Maximální zrychlení odpovídá zrychlení, kterého dosáhne vozidlo při použití veškeré síly pro vytvoření pohybu. Tuto sílu můžeme vyjádřit vztahem:

$$F_A = M \cdot a \quad (3.1)$$

kde  $a$  můžeme vyjádřit

$$a = \frac{\partial V}{\partial t}. \quad (3.2)$$

Energii  $E_A$  potřebnou pro akceleraci vozidla na referenční rychlost  $V_r$  můžeme spočítat

$$E_A = \frac{1}{2} M V_r^2. \quad (3.3)$$

Baterie EV spotřebovává energii na akceleraci. Pokud čas  $t$  odpovídá procesu akcelerace, potom vztah mezi energií a průměrným výkonem je přibližně roven:

$$E_A \approx \bar{P} t. \quad (3.4)$$

Pokud se bude výkon zvyšovat z 0 na maximální výkon  $P_{max}$  při procesu akcelerace, průměrný výkon odpovídá

$$\bar{P} \approx \frac{1}{2} P_{max}. \quad (3.5)$$

Substitucí vzorců 3.4 a 3.5 do vzorce 3.3 vznikne následující vztah

$$P_{max} \approx \frac{1}{t} M V_r^2 \quad (3.6)$$

Pro ilustraci budeme uvažovat, že typické PEV zrychlí na  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  za 10s. Ze vzorce 3.6 vyplývá, že maximální nutný výkon je  $104 \text{ kW}$  [8].

### 3.1.3 Maximální rychlost

Maximální rychlost je důležitý parametr, který popisuje EV. Jelikož aerodynamická odporová síla je přímo úměrná druhé mocnině rychlosti vozidla, tak se ve vysokých

rychlostech stává dominantní složkou odporových sil [10]. Tím pádem je maximální výkon potřebný k výpočtu maximální rychlosti  $V_{max}$ :

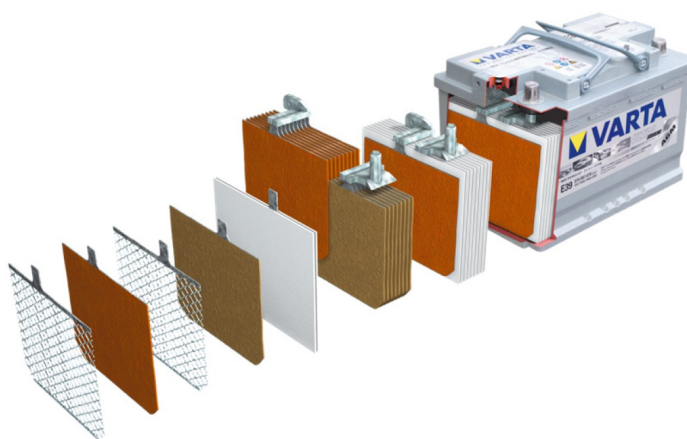
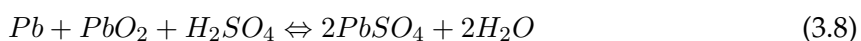
$$V_{max} = \sqrt{\frac{2P_{max}}{\rho AC_d}} + V_w. \quad (3.7)$$

Pokud je maximální výkon dodávaný z bateriového systému 30 kWh, je maximální možná rychlost  $209 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  [8].

## 3.2 Typy bateriových systémů

### 3.2.1 Olověné baterie

Olověné baterie, viz obrázek 3.5, byly vynalezeny v roce 1859 a fyzikálně jde o přeměnu z chemické energie na energii elektrickou a naopak. Akumulátor se skládá z několika párů olověných desek, jež jsou ponořeny do elektrolytu, kterým je roztok kyseliny sírové a vody. Pokud je baterie vybitá, tak je na olověných deskách usazen síran olovnatý  $PbSO_4$ . Při nabíjení se na kladné elektrodě vytváří hnědočervený oxid olovičitý  $PbO_2$  a záporná elektroda se pokryje tmavě šedou vrstvou olova. Rovnováhu mezi vybíjením a nabíjením můžeme vidět ve vzorci 3.8. Pokud je akumulátor nabitý, na svorkách elektrod naměříme napětí 2.1 V [1] [8] [14].



OBRÁZEK 3.5: Schéma olověné baterie [15]



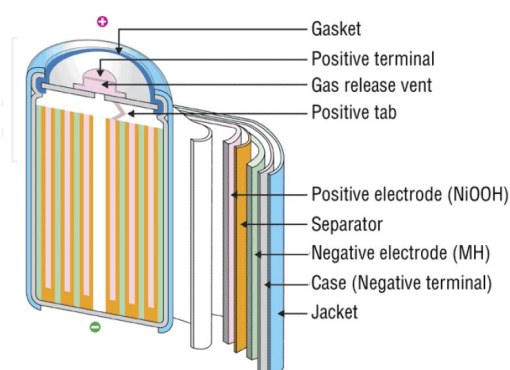
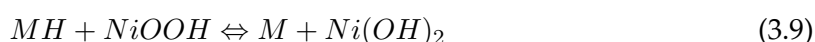
Pokud je akumulátor zcela vybit, dochází na katodě i anodě k sulfataci, což je nevratná změna, která degraduje baterii. Proto je nutné tento typ baterie neustále udržovat v nabitém stavu [8] [16].

Olověné baterie byly jako energetický zdroj pro pohon EV dříve používány, ale kvůli svému chemickému principu, krátké životnosti (4 roky nebo 700 cyklů) a relativně krátkému dojezdu od nich bylo prakticky upuštěno [17] [18].

### 3.2.2 NiMH baterie

Nikl-metal hydridový akumulátor je nejrozšířenějším typem alkalického akumulátoru. Oproti příbuznému typu NiCd baterií, NiMH baterie nepoužívají kadmium - to znamená, že jsou daleko bezpečnější a šetrnější k životnímu prostředí. Pro anodu je využit hydroxid nikelnatý, což je v principu aktivní materiál, a katoda je tvořena slitinou lanthanu, kobaltu, hliníku a manganu. Články jsou mezi sebou elektricky izolovány separátorem, alkalickým elektrolytem  $KOH$  a kovovým pouzdem. Proces vybíjení a nabíjení je popsán chemickou rovnicí 3.9, schematicky je NiMH článek znázorněn na obrázku 3.6 [8].

Elektrody těchto baterií jsou ze spěkaného niklového prášku s příměsí uhlíku, který zvyšuje elektrickou vodivost. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí od  $-10^{\circ}C$  do  $40^{\circ}C$ , jejich pracovní napětí je mezi 1.2 a 1.4 V [14].



OBRÁZEK 3.6: Schéma NiMH baterie [15]

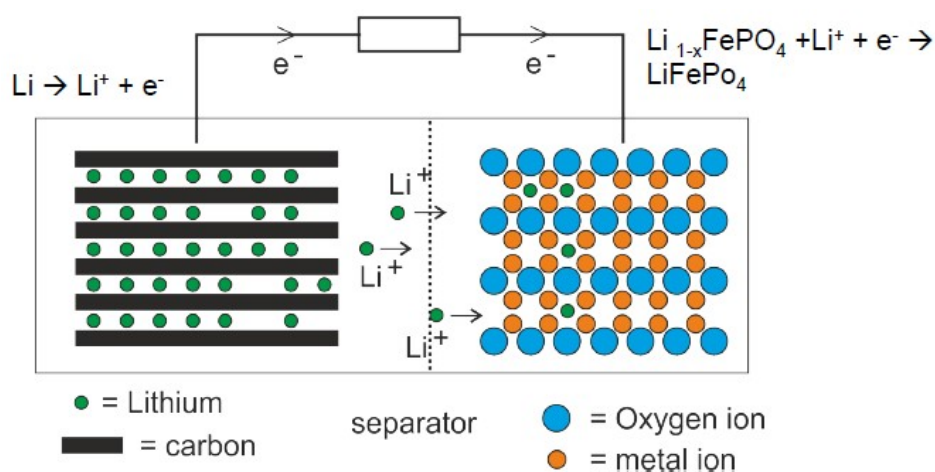
**Paměťový efekt** nastává, pokud vystavujeme NiMH baterii mělkému vybití a nabití. Po mělkém cyklování (tedy po úplném vybití nebo po úplném nabití) dochází k paměťovému kroku, tj. jako kdyby článek vzpomínal na hloubku tohoto mělkého cyklu. Velikost redukce napětí závisí na počtu předchozích mělkých cyklů a hodnotě vybíjecího proudu. To je hlavní nevýhoda při provozování EV na principu NiMH článků [15].

### 3.2.3 Lithiové baterie

Lithium iontové neboli Li-ion baterie jsou aktuálně hojně využívány, své uplatnění najdou v mobilních telefonech, osobních počítačích, fotoaparátech, ručních vysavačích nebo dnes už také v řetězových pilách a sekačkách. Takto široké využití dokázaly Li-ion baterie dosáhnout hlavně díky svým dobrým vlastnostem: vysoká hustota energie, nízká hmotnost a vysoký výkon. Dalším kladem je, že Li-ion baterie neobsahují žádné jedovaté kovy. Největší nevýhodou je potom vysoká pořizovací cena.

Využití baterií v automobilovém průmyslu je oproti klasickému využití v mobilních telefonech daleko náročnější, proto je nutné baterii podrobit řadě testů, ty jsou popsány v kapitole 4 [8] [19].

Li-ion baterie mají v porovnání s olověnými i NiMH bateriemi mnohem větší schopnost nabíjení a vybíjení, delší životní cyklus a nemají paměťový efekt [8] [15].



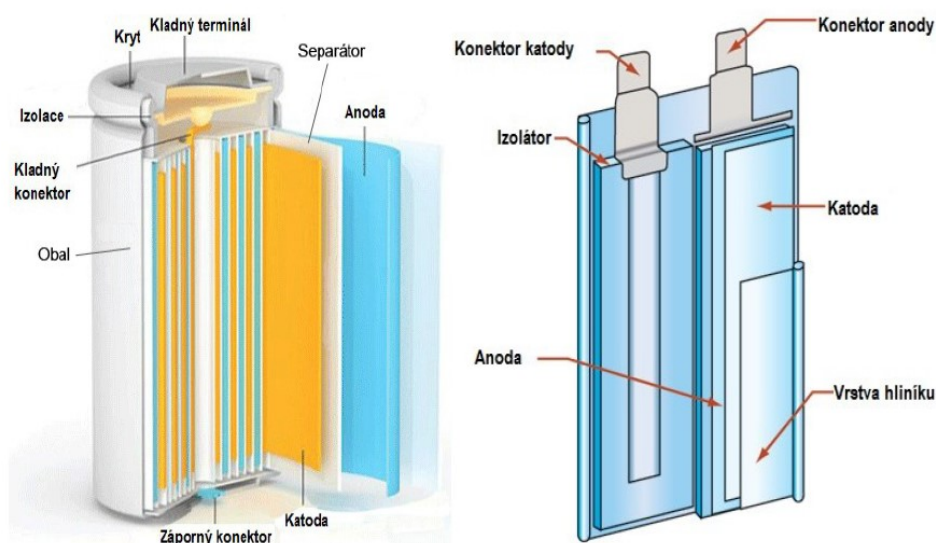
OBRÁZEK 3.7: Schéma přenosu energie Li-ion baterie

### Složení a konstrukce Li-ion baterií

Princip **lithium-iontového článku** je schématicky znázorněn na obrázku 3.7. Nejčastěji se používá jako *negativní elektroda* oxid kobaltu, používá se  $LiCoO_2$  a  $LiNiO_2$  a prvky na bázi oxidu manganického ( $LiMnO_2$  a  $LiMn_2O_4$ ). *Positivní elektroda* je většinou uhlík např. ve formě grafitu nebo jiného absorbčního materiálu s vysokou povrchovou plochou [20].

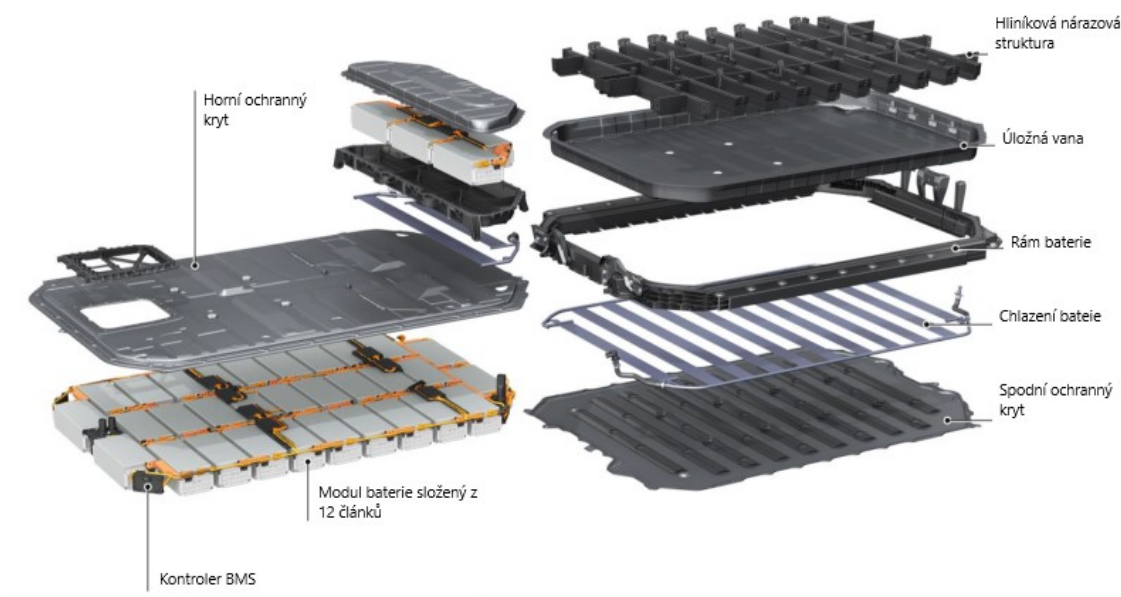
*Elektrolyt* se skládá z organické kapaliny a rozpustné lithiové soli ( $LiPF_6$ ), výsledná konzistence může být i pevná fáze. Hlavním úkolem elektrolytu je přenos kladných a záporných iontů mezi kladnou a zápornou elektrodou.

Jako *separátor* se používá mikroporézní polymerní fólie, ta je umístěna mezi pozitivní a negativní elektrodu. Mikroporézní fólie je propustná pro ionty, ale zajišťuje izolaci mezi elektrodami různé polarity. Separátor má i bezpečnostní význam, protože přímo zamezuje možnému zkratu uvnitř článku. Strukturu lithiové baterie je na obrázku 3.8. Napětí lithiových battery packů elektrických vozidel se pohybuje v rozmezí 300 až 400 V [15] [21].



OBRÁZEK 3.8: Schéma Li-ion baterie [22]

Lithiové články jsou dále skládány do **modulů**, které tvoří kompaktní celek. V každém modulu je zpravidla 10 až 30 článků. Bateriové moduly jsou následně poskládány do požadovaného tvaru a společně s hliníkovými kryty, chlazením, nárazovou strukturou a rámem baterie tvoří **pattery pack**. Ten je na jednotlivé složky rozložen na obrázku 3.9.



OBRÁZEK 3.9: Konstrukce battery packu - Audi e-tron

### Bezpečnostní prvky Li-ion baterií

Bezpečnostní prvky jsou zabudovány na všech úrovních baterie, tedy v battery packu, modulech i článcích. Bezpečnostní zařízení jsou navržena pro ochranu před nestandardními podmínkami, ve kterých se baterie může nacházet. Nejčastěji se jedná o prvky zajišťující odvod tepla a plynů.

**BMS** řídí distribuci elektrické energie v baterie a chrání ji před přepětím nebo podpětím a nadměrným proudem. Často také integruje teplotní senzory, na základě kterých může být rozhodnuto o vypnutí jednotlivých modulů, pokud byl překročen horní nebo dolní teplotní limit.

**Přetlakový ventil** umožňuje bezpečné a předvídatelné uvolňování plynu, pokud se v článcích vytvoří nadměrný tlak. Sám se aktivuje, pokud vnitřní tlak v komoře přesáhne určitou hranici. Jeho hlavní úkol je zabránit nekontrolovatelnému rozrušení článku.

**Automatické přerušení proudu** je zařízení, které přeruší vnitřní elektrické připojení při určeném vnitřním tlaku. Pokud se ve vnitřní části článku tvoří plyn, který zvyšuje interní tlak, není žádoucí, aby byly dodávky proudu zachovány.

**Chlazení baterií** je většinou prováděno vzduchem nebo kapalinou, případně baterie není chlazena vůbec. Chlazení baterie začne pouze v případě, kdy vzroste teplota nad určenou mez. Chlazení je vždy navrhováno v závislosti na daném podnebí - v severských oblastech je chladicí systém navržen tak, aby bylo baterii možné i zahřívát [23] [24].

**Separátor** můžeme též počítat mezi bezpečnostní prvky Li-ion článků. Jedná se o mikroporézní textilií, která umožňuje průchod iontů, jinak je to izolant. Díky izolačním vlastnostem dokáže zabránit zkratu v případě propojení obou elektrod oxidujícími látkami uvnitř článku.

## Kapitola 4

# Schvalování vozidel

Schvalování vozidla je soustava úkonů, která vede k získání *osvědčení o homologaci typu*. Osvědčení o homologaci je podmínkou pro uvedení vozidla na trh a jeho prodeje. Součástí schvalování vozidel je řada zkoušek a kontrol, které rozhodnou o technické způsobilosti vozidla, ty jsou určeny následující legislativou:

- předpis EHK/OSN,
- směrnice EHS/ES,
- nařízení (EU),
- ČSN/EN,
- IEC normy,
- ISO [25].

### 4.1 Předpisy Evropské hospodářské komise EHK

Předpisy Evropské hospodářské komise byly vytvořeny pro sjednocení a harmonizaci právních předpisů a norem na území Evropské unie a dalších států, které tyto předpisy akceptují. Pokud je jeden výrobek schválen podle předpisů EHK v jednom členském státě, je homologace automaticky akceptována ve všech ostatních státech Evropské unie [26].

Z hlediska schvalování elektrických vozidel se nejvyšší pozornost upíná na předpis EHK OSN č. 100, který nařizuje zkoušku bateriového systému mechanickým nárazem. Právě zkouška mechanickým nárazem je klíčová pro praktickou část této práce.

## 4.2 Zkoušky EHK OSN č. 100

Předpis EHK OSN č. 100 neboli ECE R-100 je dokument pro schvalování bateriových elektrických vozidel z hlediska zvláštních požadavků na konstrukci, funkční bezpečnost a emise vodíku. Původní znění předpisu EHK/ECE 100.00 vešlo v platnost v roce 1996. V roce 2011 byla původní verze zrevidována, nicméně se zabývala vozidlem jako celkem, kde hodnotila elektrickou bezpečnost. Bezpečnost komponent vozidla byla posuzována jako součást celkového posuzování vozidla a to jen v omezeném rozsahu.

Druhá revize předpisu EHK 100.02 byla zveřejněna v roce 2013 a provedla významné změny v procesu schvalování typu motorových vozidel a systémů dobíjení energie. Díky přechodným ustanovením se začala plně uplatňovat až v roce 2016, kdy vstoupila v platnost a stanovila samostatné testování bateriových systémů. Zároveň zavedla řadu testů, které se vztahují výhradně na tyto systémy [27]. Tento předpis byl v posledních letech několikrát revidován zejména z důvodu rostoucího počtu EV, což je příčinou vyššího počtu jejich nehod. Zde je výčet testů, kterými musí bateriový systém projít, aby byl schválen:

### Vibrace

Účelem je ověření bateriového systému ve vibrujícím prostředí, které je ve vozidle běžné.

**Instalace:** Při zkoušce musí být zkoušené zařízení pevně zajištěno na desce vibračního stroje tak, aby byly vibrace přenášeny přímo na zkoušené zařízení.

### Výchozí podmínky:

- okolní teplota musí být  $20 \pm 10^{\circ}\text{C}$
- SOC musí být minimálně 50%
- na začátku zkoušky musí být aktivní všechna ochranná zařízení, která by mohla ovlivnit funkci zařízení

**Postup zkoušky:** Vibrace mají sinusový tvar s logaritickým posunem a probíhají od 7 Hz po 50 Hz a zpět na 7 Hz, tento cyklus trvá 15 minut. Zkouška sestává celkem z 12 cyklů.

Po ukončení posledního cyklu se bateriový systém vystaví standardnímu cyklu nabíjení a vybíjení. Zkouška končí pozorováním, které trvá jednu hodinu při zkouškové teplotě.

### **Teplotní šok**

Účelem této zkoušky je ověření odolnosti proti náhlým změnám teploty.

**Instalace:** Zkouška probíhá v klimatické komoře, která je vidět na obrázku 4.1.

#### **Výchozí podmínky:**

- SOC musí být minimálně 50%
- na začátku zkoušky musí být aktivní všechna ochranná zařízení, která by mohla ovlivnit funkci zařízení

**Postup zkoušky:** Nejdříve je zkoušené zařízení vystaveno teplotě  $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$  po dobu 6 hodin. Následně se zařízení po dobu 6 hodin skladuje při teplotě  $-40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Přejít mezi kladným a záporným extrémem může být maximálně 30 minut. Celý postup se opakuje pětkrát. Po ukončení posledního cyklu zkoušení se baterie uloží na dobu 24 hodin při teplotě okolního prostředí  $20 \pm 10^{\circ}\text{C}$ . Následně se bateriový systém vystaví standardnímu cyklu nabíjení a vybíjení. Zkouška končí pozorováním po dobu 1 hodiny.

### **Mechanická celistvost**

Provádí se za účelem ověření bateriového systému při kontaktní zátěži, která může vzniknout při nehodě vozidla.

**Instalace:** Zkoušené zařízení musí být pevně zajištěno na zkušebním zařízení podle instrukcí výrobce.

#### **Výchozí podmínky:**

- okolní teplota musí být  $20 \pm 10^{\circ}\text{C}$
- SOC musí být minimálně 50%

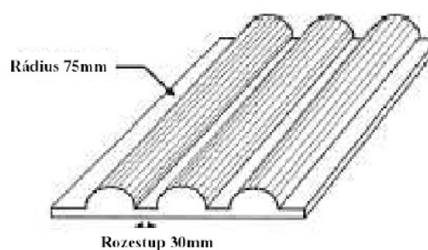


- na začátku zkoušky musí být aktivní všechna ochranná zařízení, která by mohla ovlivnit funkci zařízení

**Postup zkoušky:** Zkoušené zařízení se zatěžuje mezi překážkou a drtící deskou viz obrázek 4.2. Působení síly je minimálně 100 kN a maximálně 105 kN. Náběh účinku trvá méně než 3 minuty a doba přitlaku činí nejméně 100 ms a nejvýše 10 s. Zkouška končí pozorováním po dobu jedné hodiny při teplotě zkušebního zařízení.



OBRÁZEK 4.1:  
Klimatická  
komora



OBRÁZEK 4.2:  
Zatěžovací deska

### Odolnost proti požáru

Účelem této zkoušky je ověřit schopnost baterie odolat požáru, který by přišel z jejího vnějšího okolí.

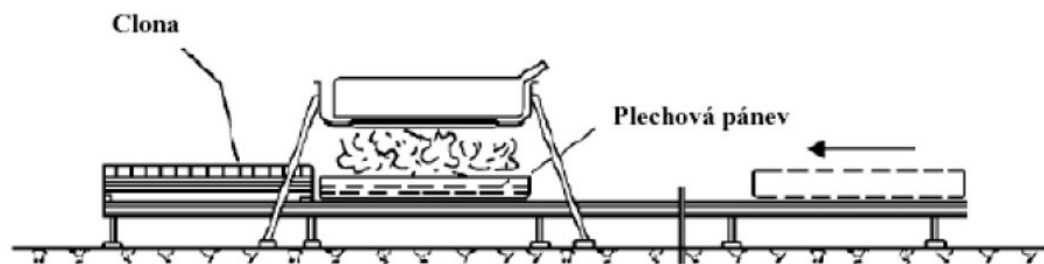
**Instalace:** Zkouška odolnosti proti požáru probíhá nad otevřeným ohněm, který vznikl hořením komerčního paliva pro zážehové motory.

**Výchozí podmínky:**

- okolní teplota musí být  $20 \pm 10^{\circ}\text{C}$
- SOC musí být minimálně 50%
- na začátku zkoušky musí být aktivní všechna ochranná zařízení, která by mohla ovlivnit funkci zařízení

**Postup zkoušky:** Zkouška probíhá ve čtyřech fázích:

1. **Předehřívání** - tato fáze trvá 60 sekund a zkoušené zařízení je během ní 3 metry od zdroje požáru.
2. **Přímé vystavení plamenu** - zkoušené zařízení se vystaví přímému plamenu po dobu 70 sekund. Schematický obrázek 4.3 znázorňuje tuto fázi.
3. **Nepřímé vystavení plamenu** - jedná se o fázi bezprostředně navazující na 2. fázi. Clona, která je na obrázku 4.3 mimo plamen, se přesune mezi testované zařízení a zdroj plamene, takto je bateriový systém vystaven žáru po dobu 60 sekund.
4. **Ukončení zkoušky** - je provedeno odstraněním zdroje hoření. U zkoušeného zařízení se neprovádí hašení a čeká se, až se zařízení uhasí samovolně. Nakonec se zkoušené zařízení pozoruje až do doby, kdy jeho povrchová teplota klesne na teplotu okolního prostředí nebo do doby, kdy teplota klesá minimálně 3 hodiny.



OBRÁZEK 4.3: Přímé vystavení plamenu

### Externí ochrana proti zkratu

Účelem této zkoušky je ověření vlastností a chování baterie při jejím vystavení zkratu. V momentě, kdy je baterie zkratována, měly by bezpečnostní systémy baterie přerušit nebo omezit zkratový proud.

**Výchozí podmínky:**

- okolní teplota musí být  $20 \pm 10^{\circ}\text{C}$
- SOC musí být minimálně 50%
- na začátku zkoušky musí být aktivní všechna ochranná zařízení, která by mohla ovlivnit funkci zařízení
- všechny stykače pro nabíjení a vybíjení musí být sepnuty - reprezentace módu jízdy

**Postup zkoušky:** Pozitivní a negativní póly zkoušeného zařízení se propojí, tím se vytvoří zkrat. Propojení pólů k tomuto účelu musí mít odpor nejvýše  $5\text{m}\Omega$ . Zkrat se udržuje do doby, kdy je potvrzeno přerušeni nebo omezení zkratového proudu. Druhý případ pro ukončení vystavování zkratu je, pokud dojde ke stabilizaci teploty tak, že její gradient je menší než  $4^{\circ}\text{C}$  za hodinu. Přímou po ukončení zkratu se provede cyklus nabíjení a vybíjení, potom se zkoušené zařízení pozoruje po dobu jedné hodiny.

**Ochrana před přebíjením**

Účelem této zkoušky je ověření vlastností testovaného zařízení při vystavení přebíjení.

**Výchozí podmínky:**

- okolní teplota musí být  $20 \pm 10^{\circ}\text{C}$
- na začátku zkoušky musí být aktivní všechna ochranná zařízení, která by mohla ovlivnit funkci zařízení
- všechny stykače pro nabíjení a vybíjení musí být sepnuty - reprezentace módu jízdy
- řídicí limity nabíjení zkoušeného zařízení musí být vypnuty

**Postup zkoušky:** Zkoušené zařízení musí být nabíjeno standardním nabíjecím proudem. Nabíjení musí probíhat až do doby, kdy je zkoušené zařízení automaticky přerušeno nebo do doby, kdy je omezeno. Po ukončení nabíjení se provede cyklus vybíjení a nabíjení a potom nastává pozorování po dobu jedné hodiny při teplotě zkušebního prostředí.

## Ochrana před nadměrným vybitím

Účelem této zkoušky je ověření vlastností při nadměrném vybití.

### Výchozí podmínky:

- okolní teplota musí být  $20 \pm 10^{\circ}\text{C}$
- na začátku zkoušky musí být aktivní všechna ochranná zařízení, která by mohla ovlivnit funkci zařízení
- všechny stykače pro nabíjení a vybíjení musí být sepnuty - reprezentace módu jízdy

**Postup zkoušky:** Velikost odebíraného proudu při vybíjení musí být ve výrobcem předepsaném rozmezí. Vybíjení musí pokračovat až do doby, kdy se vybíjení zkoušeného zařízení přeruší nebo kdy se omezí vybíjení. Pokud automatická funkce přerušení přestane fungovat nebo pokud taková funkce neexistuje, tak se bude zařízení vybíjet až do doby, dokud není zkoušené zařízení vybito na 25% svého jmenovitého napětí. Po ukončení vybíjení se provede cyklus nabíjení a vybíjení a zkouška končí pozorováním po dobu jedné hodiny při okolní teplotě zkoušeného prostředí.

## Ochrana před přehřátím

Účelem zkoušky přehřátím je ověřit vlastnosti ochranných opatření ve zkoušeném zařízení při selhání funkce chlazení.

**Instalace:** Do vnitřní části krytu je umístěno zařízení měřící teplotu, nejčastěji termočlánek.

### Výchozí podmínky:

- na začátku zkoušky musí být aktivní všechna ochranná zařízení, která by mohla ovlivnit funkci zařízení
- zkoušené zařízení je umístěno v klimatické komoře

**Postup zkoušky:** Během zkoušky se zařízení neustále nabíjí a vybíjí konstantním proudem. Pokud je zkoušené zařízení vybaveno ochrannými opatřeními proti vnitřnímu přehřívání, musí být teplota v klimatické komoře temperována na teplotu stanovenou výrobcem. V případě, že zkoušené zařízení není vybaveno zvláštními opatřeními, je klimatická komora nastavena na maximální provozní teplotu baterie.

### **Emise vodíku**

Účelem zkoušky je zjištění emise vodíku, který je uvolněn z bateriového systému při obvyklém užívání.

#### **Instalace:**

#### **Výchozí podmínky:**

- zkoušené zařízení musí být v dobrém stavu
- zkoušené zařízení musí do 7 dnů před testem projít alespoň 5 cykly nabíjení
- teplota při testování se musí udržovat v obvyklých funkčních mezích udaných výrobcem

**Postup zkoušky:** Zkouška probíhá ve 4 fázích:

1. Příprava bateriového systému
2. Vybití bateriového systému
3. Stanovení emisí vodíku při normálním nabíjení
4. Stanovení emisí vodíku při nabíjení palubní nabíječkou, která má poruchu

Emise vodíku nesmí být vyšší než 125 g za 5 hodin nebo emise vodíku v gramech nesmí být vyšší než pětadvacetinásobek doby v hodinách.

V průběhu nabíjení palubním nabíječem vykazujícím závadu musí být emise vodíku nižší než 42 gramů.

### 4.2.1 Mechanický náraz

Mezi těmito zkouškami je možné najít **mechanický náraz**, jehož implementaci řeším v praktické části. Zkoušku mechanickým nárazem je dle předpisů možné provádět buď na celém vozidle nebo na jeho konstrukční části. Pro náš případ uvažujeme pouze zkoušky na konstrukčních částech, ty musí být přichyceny pouze úchyty určenými k montáži do vozidla a musí být aktivní všechny systémy tak, aby výsledek zkoušky reprezentoval vlastnost celého systému. Účelem zkoušky je ověření bezpečnosti trakční baterie při akceleračním zatížení, které se může vyskytnout při nehodě [28]. Bateriový systém je zkoušen v podélném i příčném směru.

Všeobecné zkušební podmínky a požadavky:

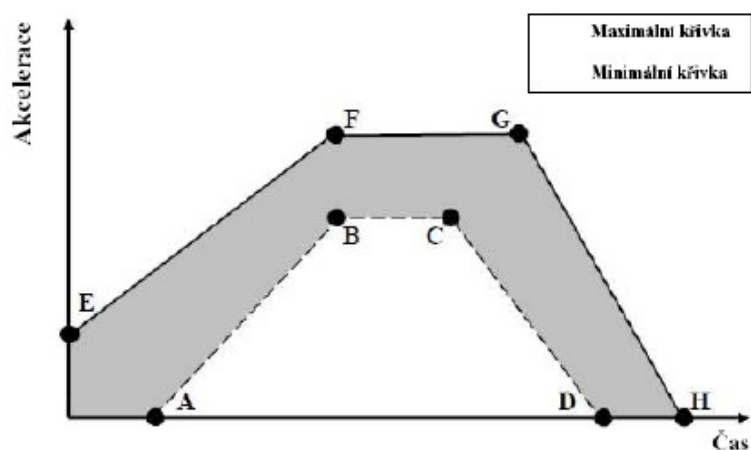
- zkouší se při okolní teplotě  $20 \pm 10^{\circ}C$ ,
- na začátku zkoušky se musí stav nabití upravit na hodnotu vyšší než 50% normálního pracovního rozsahu,
- na počátku zkoušky musí být funkční všechna ochranná zařízení, která by mohla ovlivnit funkci zkoušeného zařízení a která jsou relevantní pro výsledek zkoušky.

Zkoušené zařízení se podrobí deceleraci v souladu s mezemi akcelerace, které odpovídají obrázku 4.4 a hodnoty jednotlivých bodů odpovídají tabulce na obrázku 4.5. Tyto body jsou vybrány podle kategorie vozidel dle vyhlášky č. 341/2014 Sb. *Vyhláška o schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích*. Po ukončení zkoušky je systém pozorován po dobu jedné hodiny při zachování teploty zkušebního prostředí.

#### Ukázka protokolu ze zkoušky

Pro ilustraci průběhu zkoušení je v příloze č. 1 protokol ze zkoušky mechanickým nárazem, jeho využití pro účel této práce je odsouhlasen výrobcem zkoušené baterie i zkušebnou. Na první straně přílohy se nachází hlavička dokumentu, která určí předmět zkoušení. Na druhé straně je popsána instalace, výchozí podmínky a typ vozidla. Nárazová zkouška probíhá

podélně i příčně, proto jsou v protokolu celkem 2 diagramy zrychlení - čas, ty jsou doplněny fotografiemi bateriového systému po zkoušce. Na straně 7 a 8 jsou doplněny výsledky měření napětí, odporu a teploty každých 15 minut po dobu jedné hodiny po ukončení zkoušky.



OBRÁZEK 4.4: Všeobecný popis zkušebních impulsů

Bod	Čas	Kategorie M1 a N1 - Akcelerace (g)		Kategorie M2 a N2 - Akcelerace (g)		Kategorie M3 a N3 - Akcelerace (g)	
		Podélně	Příčně	Podélně	Příčně	Podélně	Příčně
A	20	0	0	0	0	0	0
B	50	20	8	10	5	6.6	5
C	65	20	8	10	5	6.6	5
D	100	0	0	0	0	0	0
E	0	10	4.5	5	2.5	4	2.5
F	50	28	15	17	10	12	10
G	80	28	15	17	10	12	10
H	120	0	0	0	0	0	0

OBRÁZEK 4.5: Zrychlení v jednotlivých časových okamžicích

## Kapitola 5

# Rizika při testech baterií

Testování baterií se jejich chemickou povahou stává rizikovou záležitostí, protože může dojít k poškození baterie a následnému uvolnění velkého množství energie formou hoření. Navíc se při poškození mohou uvolňovat jedovaté zplodiny. Při provádění zkoušek odolnosti vůči nárazům nebo při testech dynamického zatěžování je nanejvýš důležité mít aktualizované postupy a plně rozumět potenciálním rizikům s tím spojeným - jakékoliv kritické selhání baterie nesmí ohrozit bezpečnost zkušebního personálu a zkušebního zařízení [29].

Jako nestabilní prvek v Li-iontových bateriích se označuje elektrolyt, který obsahuje sůl s obsahem fosforu a fluoru. Elektrolyt se začíná rozkládat, když je vystaven teplotám nad 80 stupňů Celsia, pokud je teplota ještě vyšší, začíná exotermně reagovat s materiály elektrod. Při zvyšování teploty (počínaje 80°C) se rychle zvyšuje vnitřní tlak baterie. Pokud je nárůst příliš rychlý, ochranné prvky nestíhají baterii chladit a hrozí únik par elektrolytu a jiných plynů viz obr. 5.1, kterými jsou oxidy uhlíku, různé organické látky, fluoroorganika a fluorovodíky. Jestliže existuje dodatečný zdroj zapálení, může dojít k požáru [29].



OBRÁZEK 5.1: Ukázka reakce baterie po poškození [29]



## 5.1 Typické havárie baterií při testování

Různé chemické principy baterií mají různé módy havárií, ale hlavní typy příčin havárií jsou pro všechny baterie stejné. Níže jsou popsány hlavní mechanismy jejich vzniku, jsou rozděleny do kategorií *fyzické poškození*, *tepelné havárie* a *nabíjení a vybíjení*.

### 5.1.1 Fyzické poškození

Fyzické poškození nastává, pokud dojde k pohybu jedné části baterie vůči jakékoliv jiné části baterie. Při těchto pohybech může dojít k rozrušení celistvosti baterie a k vniknutí jednoho článku do článku druhého. To může způsobit zkrat (nechtěný a neočekávaný tok proudu) uvnitř článku nebo uvnitř battery packu. Fyzické poškození můžeme rozdělit na *posunutí*, *vnitřní deformace* a *deformaci* [24].

#### Posunutí

Posunutí znamená, že se jeden nebo více článků uvolní z obalu a přemístí se ze svého původního místa tak, že začne zasahovat do prostoru sousedního článku.

#### Vnitřní deformace

Vnitřní deformace je z venkovního prostoru baterie nepozorovatelná, protože k ní došlo ve vnitřní struktuře článku. To může být příčinou pozdějšího selhání baterie.

#### Deformace

Deformací je myšlena vyšší forma fyzického poškození a hovoříme o ní při výskytu změny fyzických rozměrů vyšší než 10%.

#### Zkrat

Zkrat je následný děj, který může nastat jako důsledek fyzického poškození. Jeho vlivem může baterie přejít do děje zahřívání baterie tak, jak je popsáno v odstavci 5.1.2. Nicméně každá baterie musí dle předpisů projít testováním na zkrat a její bezpečnostní prvky by na něj tedy měly být připraveny [21].

### 5.1.2 Tepelné havárie

Přehřívání nastává například pokud dojde ke zkratu uvnitř článku. Při zkratu se bude zkratovaný článek zahřívat díky Jouleovu teplu ( $I^2R$ ) až do stavu, kdy článek začne produkovat vlastní teplo vzniklé z chemických reakcí. Chemickými reakcemi se článek může ohřát nad teplotu, kde začíná nástup exotermních dějů.

V první fázi, kdy se začne článek spontánně ohřívat, má zvyšování teploty rychlost kolem  $0.2^\circ C/min$ , to není nikterak závažné, protože při správném navržení tepelných odvodů baterie je teplo rozptýleno v bateriovém packu.

Pokud nedojde k odvodu tepla, bude se teplota zvyšovat i z důvodu přetrvávajících exotermických reakcí, až se dostane do druhé fáze tzv. **akcelerace**. Akcelerace se vyznačuje rychlejším uvolňováním tepla a je způsobena zvýšenou redukcí elektrolytu na anodě. Typicky je tato fáze provázena uvolňováním kouře.

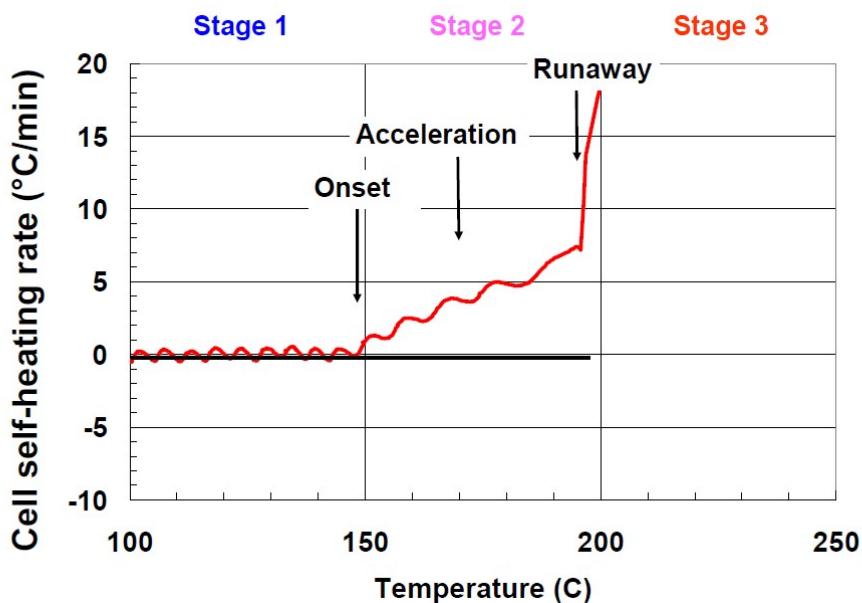
Jestliže není zahřívání zastaveno, celý proces pokračuje do třetí fáze zahřívání, která se nazývá **thermal runaway**. Při této fázi nastává vysokorychlostní katodová a/nebo anodová reakce, která způsobí prudký nárůst teploty, při které může následovat hoření nebo v krajních případech i exploze. Třetí fáze je velmi nepravděpodobná a závisí na konstrukci a chemických vlastnostech každé baterie. Hranice, kdy proces vstupuje do třetí fáze, se podle typu baterie může lišit od  $130^\circ C$  do více než  $200^\circ C$

Výše popsaný proces ohřívání baterie je dokumentován na obrázku 5.2 [21] [24].

Tepelné havárie se nejčastěji projevují nadměrným zvýšením teploty, tečením, únikem plynu nebo vzplanutím.

#### Nadměrné zvýšení teploty

Nadměrné zvýšení teploty nastává, pokud se baterie dostane do stavu *thermal runaway*, ve kterém se začíná nekontrolovatelně zahřívat. Tato teplota je u každé baterie různá, z obrázku 5.2 ale vyplývá, že se pohybuje kolem  $170^\circ C$  [24].



OBRÁZEK 5.2: Proces zahřívání bateriových článků [24]

### Tečení

Tečení je stav, kdy z baterie viditelně začne unikat elektrolyt nebo jiný materiál, který by měl za normálních okolností zůstat v útrokách bateriových článků.

### Únik plynu

Únikem plynu se myslí jakýkoliv únik plynů z článků nebo baterie během zkoušky. Plyny jsou uvolňovány zejména v případě vysokého tlaku uvnitř článků. Plyn může obsahovat unášené materiály, které mohou být zdraví nebezpečné [24].

### Vzplanutí

Za vzplanutí se považuje každý případ, při kterém z článku viditelně vystupují plameny.

### Roztržení

Za roztržení se považuje případ, kdy dojde k poškození pouzdra baterie nebo článku, které je způsobeno nahromaděním plynu nebo tekutiny, ale bez vymrštění pevné hmoty do okolí baterie.

## Exploze

Exploze nastává v krajním případě, kdy se nádoba článku nebo pouzdra baterie dynamicky rozevře a části baterie jsou vyvrženy do okolí.

### 5.1.3 Selhání při nabíjení a vybíjení

Nadměrné nabíjení (přebíjení) nebo nadměrné vybíjení může nastat, pokud v řídicí elektronice nabíjecí stanice nebo řídicí elektronice bateriových článků nastane porucha. Při poruše zařízení nedokáže určit, že je již nabité, a do bateriových článků dále proudí proud. Důsledkem toho se články stanou nestabilní - tím pádem je nestabilní i teplota a může docházet k přehřívání. Přebíjení se nemusí týkat baterie jako celku, ale může nastat i v případě, kdy má jeden článek vyšší stupeň nabití SOC než ostatní články [21] [24].

Nadměrné vybíjení není přímým rizikem pro personál ani pro zkušebnu, ale pokud dojde k opakovanému úplnému vybití, nastává degradace baterie, v pokročilých případech může docházet až k vnitřnímu zkratu. Pokud dojde k hlubokému vybití Li-ion článku, může dojít k oxidaci materiálu na kladné elektrodě. Následně může dojít až k difundaci do roztoku elektrolytu. Když je článek znovu nabit, rozpuštěná měď se může opět usadit na anodu. Po mnoha cyklech úplného vybití mohou být elektrody propojeny kovovými dendrity, které mohou vytvořit vlastní zkrat [21].

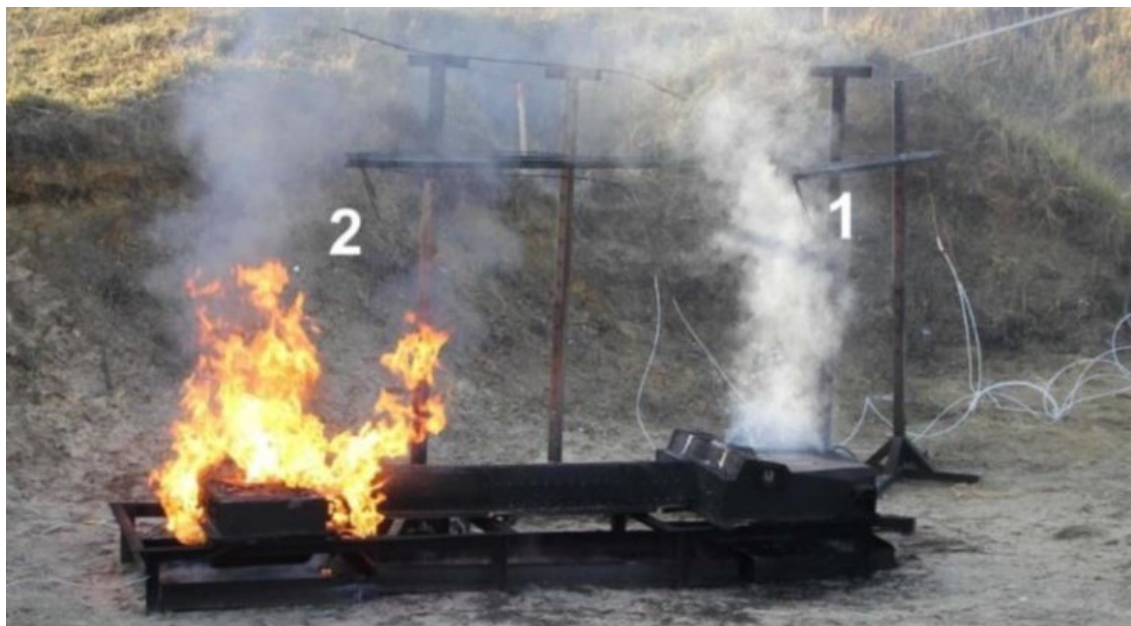
## 5.2 Řízené podpálení baterií

Technický ústav požární ochrany prováděl v roce 2015 modelové požární zkoušky trakčních baterií. Napětí na svorkách akumulátoru bylo 320 V, kapacita 80 Ah, což odpovídá přibližně 26 kWh.

U dvou vzorků baterií bylo provedeno řízené podpálení vnějším zdrojem. První baterie byla podpálena kompletně sestavená, druhá baterie byla podpálena bez horního krytu.

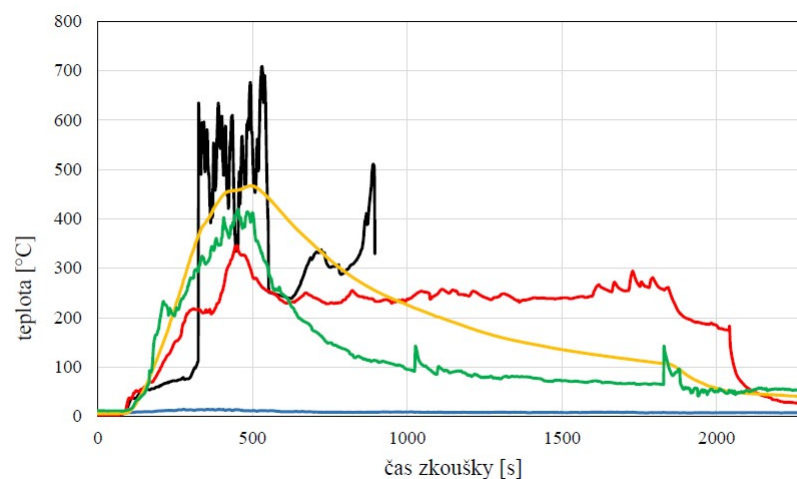
K zapálení byl využit heptan, který byl umístěn v nádržích pod bateriemi. Po zapálení heptanu došlo k rozhoření po celé ploše baterie, ale po odhoření heptanu hořela pouze baterie bez krytu. Z baterie, na které byl ponechán horní kryt, se uvolňoval šedý kouř.

Hoření je možné pozorovat na obrázku 5.3. Na baterii s krytem byly umístěny 4 termočlánky a na baterii bez krytu 5 termočlánků sledujících vývoj teploty během požáru [30].



OBRÁZEK 5.3: Hoření kompletní a odkrytované baterie [30]

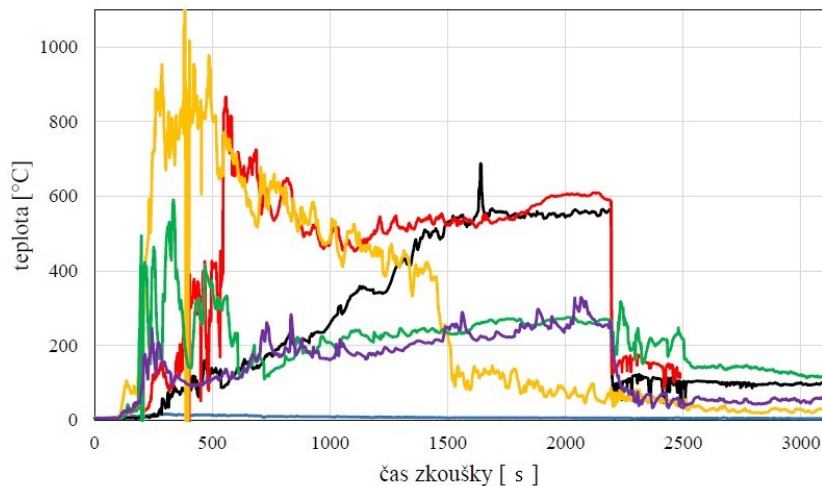
Na obrázku 5.4 jsou znázorněny průběhy teplot na jednotlivých termočláncích na baterii s krytem. Přibližně 500 sekund po začátku experimentu v okamžiku, kdy se začaly zapalovat články baterie, vzrostla teplota až na  $700^{\circ}\text{C}$ .



OBRÁZEK 5.4: Závislost teploty na čase při zkoušce baterie s krytem [30]

V případě, kdy byla baterie bez ochranného krytu, nastal kritický okamžik již po 250 sekundách a teplota přesáhla  $1000^{\circ}\text{C}$ . Vývoj je možné pozorovat na obrázku 5.5.

Při hoření baterie bez krytu se průběh všech teplot drží přibližně o 300 stupňů Celsia výše než u baterie s krytem.



OBRÁZEK 5.5: Závislost teploty na čase při zkoušce baterie bez krytu [30]

Výzkumní pracovníci z Technického ústavu požární ochrany uvádí, že baterie byly ponechány samovolnému hoření a následně byly bez větších problémů uhašeny proudem vody. Dále ve své zprávě uvedli, že baterie, které byly před zkouškou nabity, začaly hořet dříve než baterie nenabité, obecně se dá říci, že hořely lépe a maximální teploty dosahovaly vyšších hodnot [30].

### 5.3 Rizika při manipulaci s baterií

**Elektrická bezpečnost** - jelikož je baterie zdrojem vysokého napětí, je třeba být například před dotykem vodivé části, která není viditelně vodivě spojena s kostrou kontejneru, ostražitý. Je vhodné používat příslušné ochranné izolační pomůcky.

**Chemická bezpečnost** - u starších typů akumulátorů (např. olověných) bylo nebezpečí poleptání elektrolytem. U moderních lithiových článků poleptání nehrozí, protože každý článek je hermetizován. Kritická událost nastane pouze v případě mechanického poškození, kdy nastává možnost přímého kontaktu s elektrolytem.

**Bezpečnost při manipulaci** - baterie pro moderní automobily může dosahovat hmotnosti od vyšších desítek kilogramů až do úrovně 600 kg. Při manipulaci je nutné dodržet bezpečnostní předpisy a vybavení pracovníků ochrannou obuví a ochrannými rukavicemi. Pro zajištění bezpečnosti v průběhu rázových zkoušek je nutné znát o baterii následující informace:

- Obsah energie v baterii v kWh
- Akceptovatelný rozsah vnějších teplot
- Maximální napětí na svorkách baterie
- Hmotnost baterie
- Hmotnost článků
- Technologie článků
- Použité materiály (inhibitory hoření, izolační hmoty)

## Kapitola 6

# Projekt

Praktická část této diplomové práce, jejímž hlavním cílem bylo integrovat test dynamického nárazu baterie podle předpisu Evropské hospodářské komise EHK 100 do zkouškového portfolia firmy TÜV SÜD Czech s.r.o. Celý proces vedoucí k tomuto cíli byl realizován standardizovaným projektem (pracovně odznačován jako DYBAT), který měl jasně zadaný cíl, řešitele, externí spolupracovníky, časový plán a měl také známé podmínky financování.

### 6.1 Cíle a předpoklady projektu

Základní cíl, který byl na počátku celého projektu určen, bylo rozšíření nabízeného portfolia zkoušek o dynamické testování baterií. Tento cíl se opíral i o další záměry, se kterými dohromady tvoří logický celek. Mezi tyto záměry a zároveň další cíle patří umožnění testování baterií osobních i nákladních vozidel a také baterií autobusů. Z tohoto cíle plyne nutnost se v projektu zaměřit na rozměry a hmotnost baterií výše uvedených kategorií vozidel, které budou později klíčové pro zajištění procesů a bezpečnosti.

Dále je nutné, aby veškeré postupy byly v souladu s požadavky zkušebních předpisů, ale také s předpisy skladovacími a předpisy pro elektrickou bezpečnost. S tímto úzce souvisí i bezpečnost všech zkušebních inženýrů a zároveň je nutné dbát na bezpečnost všech osob nacházejících se v areálu logistického parku Bezděčín.

Důraz byl kladen také na to, aby navrhovaná opáření neovlivňovala žádným způsobem nebo jen v přijatelné míře běžný chod objektu a dalších laboratoří, které jsou jeho součástí. Základním předpokladem, který definuje celou řadu omezení a výchozích podmínek, byla skutečnost, že testování bude probíhat v laboratoři DYCOT. Rozložení laboratoře, které je popsáno v kapitole 6.3.3, je závazně zadáno a musí zůstat zachované. Dále bylo při tomto



projektu nutné počítat se zažitými a optimalizovanými postupy a procesy laboratoře, do kterých není dobré zasahovat. Navíc je nutné počítat s omezeným technickým vybavením. Pro funkci a smysl celého projektu je nutné zajistit ekonomickou návratnost a zkušební kapacitu.

## 6.2 Projektový tým

Společnost TÜV SÜD Czech s.r.o. se zabývá testováním, inspekcí, certifikací, homologací a vzděláváním ve všech odvětvích průmyslu a služeb. Aby bylo možné obsáhnout všechny tyto aktivity, je firma rozčleněna na několik divizí. Jedna z nich - *Automotive* - zastřešuje chod dotčené laboratoře a celý tento projekt.

Jako hlavní řešitelé se na projektu podíleli následující členové týmu: vedoucí projektu, jehož specializací je elektromobilita, další členka týmu, která měla za úkol konstrukci a pevnostní analýzu, a já jsem měl na starosti proces, bezpečnost a zázemí v průběhu zkoušky.

Projektovou podporu zajišťovalo: *výpočetní středisko*, které pro konzultace poskytlo tři osoby v oblasti konstrukce a výpočtů; *středisko elektrických zkoušek* zajišťovalo konzultace spojené s elektrickou bezpečností; *středisko DYCOT* zajišťovalo konzultace spojené s implementací do laboratoře; *středisko elektromobility* zajišťovalo projektové vedení.

## 6.3 Stávající stav laboratoře

Navrhované řešení pro testování baterií je zpracováno pro laboratoř dynamického testování komponent - DYCOT. Jedná se o laboratoř, ve které se provádějí zkoušky fyzické simulace nárazů.

### 6.3.1 DYCOT

Vzhledem k vysokému tlaku na zkracování doby a nákladů na vývoj automobilů bylo nutné vyvinout nové nedestruktivní zkušební metody. Mezi tyto průlomové metody patří i technologie DYCOT, která nabízí alternativní možnosti a efektivnější přístup k fyzickým nárazovým zkouškám tím, že umožňuje komplexní fyzické simulace nárazu vozidla včetně simulací chování jeho systémů při dopravních nehodách.

Laboratoř je vybavena saňovou technologií INSTRON CSA - jedná se o hydraulický katapult. Katapult je schopen urychlit zkoušený předmět ve velmi krátkém časovém okamžiku. Následně je zkoušený předmět opět ve velmi krátkém časovém okamžiku zbrzděn. Tímto způsobem vznikne pulz zrychlení, který může být ovlivněn a tvarován různými konfiguracemi každého výstřelu. Díky této vlastnosti, tedy že může být každý pulz nastaven, je možné simulovat průběhy zrychlení tak, jak probíhají při destruktivních nehodách. [31] [32]

Na tomto přístroji bylo doposud možné testovat zádržné systémy, jako jsou záchytné pásy a air bagy, nebo konstrukční části podle platné legislativy. Součástí této práce je soubor vylepšení a opatření, která by měla umožnit budoucí testování trakčních baterií EV. [32]

### 6.3.2 Vybavení laboratoře

#### 1. Pulzní katapult

- síla katapultu až 2.5 MN
- zrychlení 90 G při 1000 kg / 35 G při 5000 kg
- maximální rychlost  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
- maximální gradient  $14 \text{ G} \cdot \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$

#### 2. Vysokorychlostní kamerový systém HS Vision

#### 3. Měřicí technika a snímače Kistler

#### 4. Zkušební instrumentované figuríny Hybrid III 5%, 50%,95%, WS, Qs

#### 5. Dynamická 3D fotogrametrie [32]

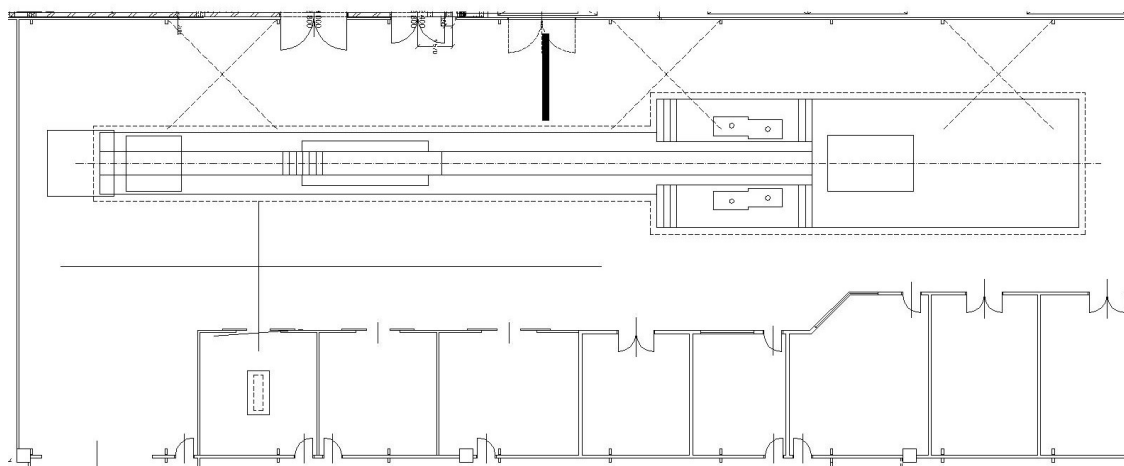
#### 6. Stropní jeřáb - nosnost 3000 kg

#### 7. Systém vzduchotechniky

#### 8. Elektrický vysokozdvizný vozík Linde H50EL, nosnost 5000kg

### 6.3.3 Rozložení laboratoře

Laboratoř DYCOT je situována v hale, kde se nachází dalších několik zkušebních místností, celý výkres kvůli zachování tajemství firmy není v této práci uváděn. Na obrázku 6.1 můžeme vidět výkres samotné testovací místnosti DYCOT.



OBRÁZEK 6.1: Výkres rozložení zkušebny DYCOT

V pravé části obrázku 6.1 je umístěna strojovna, která je dominantní částí celé laboratoře. Zde se nachází hydraulický katapult, který zvládne uvést testované zařízení do pohybu (v závislosti na hmotnosti) se zrychlením až 90 G. Katapult je možné vidět také na obrázku 6.2, kde je zachycen také skelet karoserie při dynamickém pulzu. Testovaná část vozidla se po uvedení do pohybu pohybuje po další důležité části - ocelových saních. Na ty je kladen vysoký technologický důraz, jelikož musí být naprosto přímé a hladké tak, aby nevytvářely žádné nepříznivé odchylky v průběhu pulzu zrychlení. V pravém dolním rohu se nachází velicí kryt, který slouží k řízení každého testu, který je na DYCOT prováděn. Všechny osoby musí být v průběhu zkoušky ve velicím krytu, který je vybaven speciálními bezpečnostními zařízeními, jako jsou pevnostní výplně oken, automatický zámek dveří atd. Poslední důležitou částí laboratoře jsou přípravné místnosti, které jsou určeny k přípravě testovaných vzorků.

### 6.3.4 Další součásti komplexu

V prostorách firmy se mimo laboratoř DYCOT nachází ještě několik dalších laboratoří, mezi které patří laboratoř pevnostních zkoušek. Zde se provádějí pevnostní zkoušky například



OBRÁZEK 6.2: DYCOT - Skelet karoserie při dynamickém pulzu [32]

sedaček, zkoušky ukotvení zádržných pásů ISOFIX nebo zkoušky pevnosti opěrek hlavy. Další laboratoří je zkušebna EMC, kde probíhají zkoušky elektromagnetické kompatibility. Nachází se zde i zkušebna airbagů.

Je nutné dbát na to, aby dopadem tohoto projektu nebyl ovlivněn jejich běžný chod.

## 6.4 Vývoj konceptu

Z důvodu vysokých rizik při nestandardním chování baterie, popsaných v kapitole 5, se hned od prvních okamžiků plánování tohoto projektu počítalo s tím, že baterie bude během testování uzavřena do ochranného boxu. Tento box měl sloužit jako ochranná schránka, která zabrání případnému šíření požáru a dalším tepelným haváriím, které jsou popsány v odstavci 5.1.2.

Dále jsme rozhodli, že celý systém bude ihned po ukončení testování vyvezen do venkovních prostor, aby se omezilo riziko poškození laboratorního vybavení. K poškození vybavení laboratoře by mohlo dojít také při hašení vodou, proto bude mechanismus využit

zároveň jako zaplavovací nádoba. Zaplavení vodou jsme po konzultaci s hasiči zvolili jako nejefektivnější způsob hašení.

Při fyzickém poškození baterie 5.1.1 a po selhání všech bezpečnostních prvků 3.2.3 může dojít ke zkratu. Tím by se mohly osoby, které by přišly do kontaktu s poškozenou baterií, vystavit riziku elektrického výboje.

Na základě těchto skutečností - možné vysoké teploty a možného elektrického výboje, jsme rozhodli, že mechanismus odepínání boxu musí být rychloodnímatelný a bez nutné přítomnosti technika v bezprostřední blízkosti zkušebního boxu. Z tohoto důvodu je preferováno konstrukčně jednoduché mechanické řešení, které bude prováděno bez přímého kontaktu pomocí vysokozdvizného vozíku. V případě jakýchkoli komplikací je bude moci provést manuálně vyškoleným pracovníkem laboratoře.

#### 6.4.1 Analýza trhu baterií

Analýza trhu baterií byla provedena zejména kvůli volbě základních parametrů testovacího boxu. Zde je uveden vzorek uvažovaných osobních vozidel tak, aby zahrnoval všechny třídy vozidel dle jejich velikosti:

Vozidlo	Hmotnost [kg]	Kapacita [kWh]	Rozměry [mm]
Nissan Leaf	174	24	1570x1188x265
VW e-Golf	345	35.6	-
Tesla Model S	720	100	2600x1500
BMW i3	278	42.2	1660x964x174
BMW i8	98	11.6	1460x305x330
Škoda Vision E	-	-	1510

Dále byly uvažovány i nákladní vozidla a autobusy, praxe pro tyto dvě skupiny vozidel je taková, že jejich bateriový systém sestává z několika stejných bateriových modulů. Podle výkresové dokumentace, která byla poskytnuta výrobcí, jsou tyto moduly stavěny kompaktně a téměř ve všech případech jsou rozměry v půdorysu menší než 2000x2000 mm, výška je potom kolem 500 mm, ale ani v jednom případě není vyšší než 1000 mm. Hmotnost jednoho bateriového modulu je oproti bateriovým systémům osobních vozidel



OBRÁZEK 6.3: Nissan Leaf, VW e-Golf, Tesla Model S



OBRÁZEK 6.4: BMW i3, BMW i8, Škoda VisionE

výrazně vyšší a atakuje hranici 1000 kg.

U osobních vozidel je snaha pro umístění baterií využít celou horizontální plochu vozidla a naopak co nejméně zasahovat do prostoru kabiny. Proto jsou jejich bateriové systémy zpravidla ploché, ale délka u vozidel vyšší třídy často přesahuje 2,5 metru. Hmotnost v případě osobního automobilu Tesla Model S činí 720 kg, ostatní automobilky neprodukují tak velké vozy a jejich hmotnost je tak nižší.

Bateriové moduly nákladních vozidel a autobusů mají oproti osobním vyšší hmotnost. Ta by se v budoucnu nemusela výrazně zvyšovat, protože by se tím zhoršila manipulovatelnost. Pravděpodobnější je, že v autobusech i nákladních automobilech budou přibývat moduly, což nemá na jejich zkoušení vliv.

#### 6.4.2 Požadavky na zkušební zařízení

Vzhledem k velkým odlišnostem obou skupin vozidel popisovaných v předchozím odstavci 6.4.1 jsme došli k závěru, že budeme pracovat se dvěma variantami boxu. Navrhli jsme menší box s rozměry 2x2x1 m, který bude využíván pro malá EV a moduly pro autobusy a nákladní vozy. Druhý větší box s rozměry 3x2x1 m bude využíván pro velká EV a rozměrné

moduly autobusů.

Pro oba typy boxů byla stanovena maximální hmotnost baterie 1200 kg, a to z důvodu omezené hmotnosti, kterou je možné umístit na testovací saně, a také kvůli zajištění možnosti manipulování pomocí vysokozdvížného vozíku a jeřábu.

Aby navrhovaný box mohl sloužit svému hlavnímu účelu, je nutné testovanou baterii upevnit odpovídajícím způsobem jako ve vozidle. K tomuto účelu bude sloužit upevňovací mezirám, který bude dodáván výrobcem baterie. Pro zajištění kompatibility upevňovacího mezirámu a boxu je na dno boxu navržen rastr závitových děr, který umožní upevnit jakýkoli upevňovací mezirám.

### 6.4.3 Popis navrhovaného boxu

Jak již bylo řečeno v předchozím odstavci, byly navrženy dvě varianty ochranných boxů. Z bezpečnostního a procesního hlediska jsou shodné, proto bude popsána jen jedna z nich. Na obrázku 6.5 je zobrazen větší box 3x2x1 m spolu se saňovým mezidílem.

#### Pracovní varianty návrhů

V první fázi jsme měli navržených několik variant. Byl to například koncept, kdy by baterie byla při testu uložena v ocelové vaně a ihned po testu by byla uzavřena víkem, které bylo připraveno nad saněmi. Nebo varianta, kdy by na konci saní byla připravena nádrž s výpustí vyvedenou nad trajektorii baterie, která by se v případě požáru vypustila do zkušební nádoby. Z obou variant bylo převzato to nejlepší a byl vytvořen výše popsaný koncept.

#### Konstrukce

Konstrukci boxu jsme navrhli jako žáruvzdornou, protože z poznatků o hoření baterií vyplývá, že požár může dosahovat teplot blížících se  $1000^{\circ}\text{C}$ . Navíc při hoření dochází ke koncentraci plamene na jedno místo, které je tak vystaveno velkému žáru. Proto jsme navrhli stěny z dvojitého ocelového plátu o tloušťce 3 mm, které jsme vyplnili izolační rohoží ze

skelného vlákna, která má klasifikační teplotu 1200°C.

### **Víko**

Uzávěr boxu prošel několika vývojovými stádii. Nejprve jsme navrhovali, aby box byl hermeticky uzavřen a víko připevněno ke konstrukci boxu pomocí šroubů. Tato varianta nakonec nebyla realizovaná, protože riziko, které plynulo z možného natlakování a následné exploze boxu, bylo příliš veliké.

Nakonec jsme víko navrhli jako výklopné s plynovými vzpěrami, které ho udrží v otevřené pozici při instalaci baterie do boxu. Víko se skládá ze tří hlavních komponent: izolační rohož, perforovaný plech a profilový rámeček. *Izolační rohož* je využita kvůli tomu, že je prodyšná a nehrozí natlakování boxu. Dále díky své struktuře dokáže zabránit pohybu velmi malých částí baterie, které se mohou uvolnit z baterie v případě exploze, a také díky své vysoké žáruvzdornosti zabránit na potřebný čas prohoření ohně ven z boxu. *Perforovaný plech* je navržen pro zamezení pohybu středních a velkých částí baterie při explozi ven z boxu. *Profilový rámeček* je hlavní konstrukční součást víka, která drží jeho tvar a upínají se na něj ostatní komponenty.

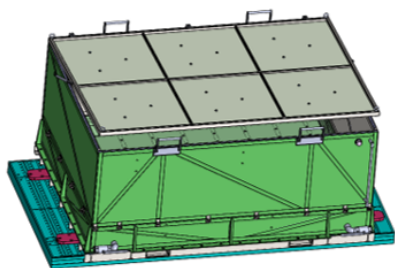
### **Senzorika**

Pro zajištění bezpečnosti bylo také nutné zajistit kontinuální sledování stavu baterie. Důležitým parametrem byla zejména teplota. Proto bylo navrženo umístění termočlánků, které snímají aktuální teplotu na různých místech baterie. Data o teplotě jsou posílána do data loggeru, ten následně bezdrátově přenese informace do řídicího počítače.

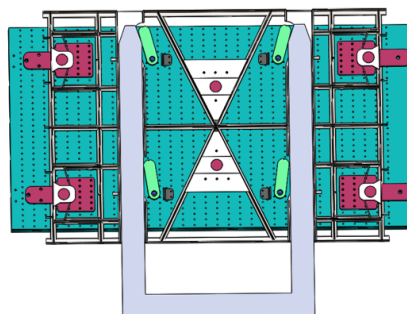
### **Manipulace**

Manipulace je prováděna primárně otvory určenými pro vidle vysokozdvizného vozíku v mezidílu. Dále jsme navrhli oka v horní části boxu na možnou manipulaci pomocí stropního jeřábu. Aby bylo možné box převézt pomocí vysokozdvizného vozíku, i když nebude spojen s mezidílem, byla prostá oka modifikována na oka, do kterých je možné umístit vidle vozíku. Tato oka jsou zároveň využitelná pro stropní jeřáb.





OBRÁZEK 6.5:  
Navrhovaný box  
[33]



OBRÁZEK 6.6:  
Detail západek  
[33]

### Zaplavování vodou

Zařízení jsme přizpůsobili tomu, aby v případě požáru bylo možné hasicí kapalinu vlévat přímo do boxu. Proto je box vybaven napouštěcím a vypouštěcím ventilem. Do obou ventilů je možné zapojit požární hadici typu B, kterou disponují hasičské jednotky.

Pro případ hašení uvnitř laboratoře je nežádoucí, aby voda unikala mimo prostor boxu. Z tohoto důvodu jsme box vybavili stavoznakem, který indikuje množství kapaliny v boxu.

#### 6.4.4 Mechanismus

Celý mechanismus je založen na schopnosti rychlého uvolňování bez nutnosti přímého lidského zásahu. To je umožněno speciálním konstrukčním dílem, kterému říkáme mezidíl. Tento mezidíl se skládá ze dvou částí, spodní část je pevně připevněna k saním testovacího katapultu, horní část je zase pevně připevněna ke dnu testovacího boxu. Obě části mezidílu jsou k sobě při testu pevně zaaretovány otočnými západkami, které jsou v tento okamžik v dráze vidlí vysokozdvížného vozíku.

Odepínání boxu ze saní je prováděno vidlemi vysokozdvížného vozíku. Po zasunutí vidlí do kapes jsou západky otáčeny, a pokud se vidle dostanou až nakonec mezidílu, je možné horní část mezidílu společně s boxem zvednout.

#### 6.4.5 Analýza rizik

Kvůli zajištění maximální bezpečnosti jsme provedli analýzu rizik, její vyjádření můžete vidět na obrázku 6.7. Nejprve byl sepsán seznam všech možných rizik, které jsou při

průběhu zkoušky myslitelné. Následně byla každému riziku přiřazena pravděpodobnost od 1 (minimální pravděpodobnost vzniku) do 10 (maximální pravděpodobnost vzniku) a dopad od 1 (zanedbatelný dopad) do 10 (velmi vážný dopad). Všechna rizika mají relativně nízkou míru pravděpodobnosti, proto je zde pozorovatelný vysoký výskyt ohodnocení číslicí 1. Nejvyšší pravděpodobností bylo oznámkováno riziko *Nepřesné zastavení saní*. U událostí pracujeme s velmi malou pravděpodobností, ale s vysokými dopady, proto je pro zajištění bezpečnosti nutné se zabývat každým rizikem.

Vyhodnocením této analýzy je sloupec s názvem *Úroveň rizika*, který je součinem *Pravděpodobnosti* a *Dopadu*. Úroveň rizika se může pohybovat na intervalu od 1 do 100 - čím vyšší výsledek, tím vyšší úroveň skutečného rizika. V našem případě vyšla nejvyšší míra rizika 18, což je v dolní pětině celého intervalu. To znamená, že i událost s nejvyšší mírou rizika je relativně málo riziková. Každopádně nám tato analýza odhaluje nejvážnější děje, na které se musíme zaměřit. Jsou jimi: požár, výbuch/roztržení boxu, nemožnost odebrání boxu ze saní.

Rizika	Pravděpodobnost	Dopad	Úroveň rizika	Řešení	Eliminace vzniku	Přenesení	Zmírnění	Akceptace
Příliš velká baterie	1	6	6	Dekra, nový box	Vycházíme ze vzorku 10 baterií, z nichž se nevešla jen jedna	Dekra		Nový box
Vzpříčení při odebrání boxu v případě požáru	1	10	10		Testovací pokusy	Mechanické uvolňování	Záložní hasicí proud	
Požár	2	9	18	Hasiči		Žáruvzdorný box	Hasičská jednotka	
Elektrický výboj	1	4	4			Ochranné pomůcky		
Únik plynů do laboratoře/skladu	1	3	3	Větrání			Větrání	Vykližení postižených
Porucha VZV při požáru	1	9	9	Náhradní VZV, jeřáb	Dobrý technický stav VZV	Záložní proud	Náhradní VZV	
Únik kontaminované vody	2	4	8		Zádržná kád' v kontejneru			
Nemožnost otevření vrat	1	5	5	Hašení uvnitř	Mechanické uvolnění dveří; Otevření dveří před zkouškou			
Utržení boxu	1	3	3		FEM simulace			
Výbuch/roztržení boxu	1	10	10	Prodyšné víko boxu	FEM simulace			FEL-nedojde k výbuchu, ale k hoření
Utržení baterie	1	2	2		FEM simulace		Stěny boxu	
Nepřesné zastavení saní	4	2	8	Variabilita VZV				
Zanešený ventil	1	4	4	Záložní ventil, přímé napouštění				Záložní ventil (přetlakový i hasební)
Aktivace detektoru ve skladu I	1	4	4	Kontrola baterií, hasiči	Bezpečné zacházení s baterií		Hasiči	

OBRÁZEK 6.7: Analýza rizik

**Požár** není možné eliminovat, protože je nemožné ovlivnit chování baterie. Toto riziko můžeme zmírnit přítomností hasičské jednotky při každé dynamické zkoušce baterií. Do jisté míry toto riziko eliminuje žáruvzdorný box.

**Výbuch** opět není možné eliminovat a může nastat v naprosto krajních případech samovolně. Nicméně roztržení boxu je eliminováno prodyšným víkem, které v případě výbuchu bude hlavním výstupem energie z boxu. Navíc je víko uzpůsobeno pro zachycení úlomků baterie.

**Nemožnost odebírání boxu ze saní** může nastat, pokud dojde k nějakému neočekávanému ději v konstrukci mezidílu. Toto riziko můžeme eliminovat testovacími pokusy, které by měly ověřit, že k zaseknutí konstrukce nedojde. Pokud se tak při zkoušce stane i přes testování mechanismu, přichází na řadu záložní řešení, kterým je manuální vytlučení západek. A pokud ani záložní řešení není uskutečnitelné (není z bezpečnostního hlediska možná přítomnost pracovníka u boxu), přichází na řadu hašení přímo na testovacím zařízení.

Mimo tyto tři scénáře s nejvyšší úrovní rizika, na které jsme se zaměřili primárně, jsme pracovali i se všemi ostatními. Ke každému z nich jsme přidali opatření nebo nouzové scénáře, které je eliminují, přenesou, zmírní nebo je budeme akceptovat. Jednotlivá řešení jsou popsána v tabulce 6.7.

## 6.5 Průběh zkoušky

V následujících odstavcích se zaměřím na popis navržených dějů a postupů, které je nutné učinit před zkouškou, při zkoušce a po zkoušce.

### 6.5.1 Procesy před zkouškou

#### Upevňovací mezirám

Aby bylo možné provést dynamickou zkoušku baterie, je nutné získat 3D model, na základě kterého se ověří kompatibilita boxu a baterie. Potom musí dojít k návrhu upevňovacího mezirámu, který bude sloužit k pevnému propojení baterie a boxu, a přitom k němu bude baterie upevněna stejným způsobem jako ve vozidle.

### **Skladování baterie**

Kvůli časové rezervě, možným úpravám upevňovacího mezirámu a zkušební montáži do boxu je na místě, aby byla baterie přítomna v laboratořích přibližně 14 dní před samotnou zkouškou. Proto je nutné ji na tuto dobu uskladnit. Před zkouškou se uvažuje, že je baterie v pořádku, a proto může být skladována v interním skladu. Pro její skladování je vyčleněno stálé skladovací místo, které navrhujeme vybavit hlásiči požáru a plynovými čidly. Její skladování musí odpovídat normě ČSN EN 50604-1 *Akumulátorové lithiové baterie pro EV*, která stanoví, že skladovací prostředí musí být suché, čisté a teplota by měla být ( $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ). Po testu musí být s baterií nakládáno jako s potenciálně poškozenou a nesmí být skladována ve vnitřním skladu.

### **Hasičské družstvo**

Při každé zkoušce je nutná přítomnost hasičského družstva. Vyžadováni budou čtyři hasiči, kteří by měli být na místě přibližně 2 hodiny před zkouškou. Hasičský vůz s objemem vodní nádrže  $8.5\text{m}^3$  bude přistaven na oranžovém stanovišti na obrázku 6.8. Hasiči následně provedou přípravu hasičského zařízení a sestaví požární vedení. Pro zajištění naprosté bezpečnosti testování navrhujeme sestavit dvě vedení, jeden požární proud bude mířit do laboratoře DYCOT a druhý bude mířit k ocelovému kontejneru, který je reprezentován žlutým obdélníkem.

### **Vysokozdvížený vozík**

Vysokozdvížený vozík je klíčovým elementem procesu převozu baterie ze zkušební laboratoře do venkovních prostor. Prvotní odhady hmotnosti celého převáženého břemene se vyšplhaly k hmotnosti 5000 kg. Vzhledem k tomu, že vzdálenost těžiště od paty vidle pro box  $3\text{x}2\text{x}1\text{ m}$  je až 1500 mm, jsme počítali s vypůjčením vozíku o nosnosti 8000 kg.

V průběhu optimalizace konstrukce boxu vyšlo najevo, že samotná konstrukce boxu a mezidílu bude mít hmotnost pouze 2000 kg. Proto jsme opět začali pracovat s variantou využití vozíku, který je ve výbavě laboratoře. Jenže box byl navržen na větší vozík, který



OBRÁZEK 6.8: Situace umístění hasičské jednotky a evakuační zóny

má vidle ve větší vzdálenosti od sebe než dokáže zajistit vozík Linde H50EL. Zároveň jsme potřebovali ponechat návrh konstrukce pro větší vozík, abychom dokázali odvézt i nejtěžší baterie. Proto jsme hledali varianty, které by umožnily zvětšení délky mezi vidlemi vozíku dostupného v laboratoři. V úvahu připadají následující možnosti:

- mimoobrysově hydraulické zařízení - instaluje se přímo na ISO desku a umožní úpravu rozevření dle potřeby, vysoké pořizovací náklady,
- traverza - zavěsí a upevní se přímo na ISO desku, při každém použití nutno demontovat původní vidle a instalovat traverzu, není možné provádět další úpravy rozměru rozevření.

Další možností je zakoupení nového vozíku podle požadovaných rozměrů a nosností.

### Únikové prostory

Únikové prostory, kterými se myslí venkovní i vnitřní prostory po celé délce trajektorie pohybu VZV (viz obrázek 6.12), musí být minimálně 10 minut před výstřelem vyklizené a bezpečné pro jízdu VZV. Všichni zaměstnanci i návštěvníci laboratoří musí být s touto

skutečností seznámeni. Dále budou všechny vstupy do únikových prostor zabezpečeny zákazovou cedulí. Evakuován bude muset být i prostor v okolí karanténního kontejneru 6.8, vyklizenou zónu kolem něho jsme navrhli jako kruh o poloměru 25 metrů, protože díky tomu, že kruh dosahuje až na hranu budovy, docílíme zastavení veškerého pohybu v okolí kontejneru.

### Úpravy laboratoře

Kvůli přítomnosti lithiových baterií v prostorech laboratoře a kvůli zajištění bezpečnosti, které je spojeno se zkoušením baterií, jsou nutné úpravy vnitřních i venkovních prostor zkušebny.

**Detektory plynu** jsou navrženy pro zajištění bezpečného skladování a nabíjení baterie. Prostor, ve kterém bude baterie umístěna, bude pod permanentním dozorem. Skladovací prostor i přípravná budou vybaveny detektory plynu, které odhalí nestandardní chování baterie v případě požáru. Vybrána byla sada senzorů, která dokáže detekovat všechny látky, které mohou vzniknout při hoření baterií, jmenovitě: oxid uhelnatý, VOC - těkavé organické látky, výbušné látky na celém rozsahu DMV, fluorovodík, chlorovodík, oxid siřičitý a kyanovodík.

Nejprve jsme pracovali s variantou, že těmito senzory vybavíme veškeré skladovací prostory. Vybavení celého prostoru skladu plynovými čidly by nedávalo ekonomický smysl, proto jsme nakonec navrhli vyčlenit pro skladování baterií jedno regálové místo, které bude plynovými senzory vybaveno lokálně. Jednotlivé senzory budou umístěny nad regálovým místem a vedle něho v závislosti na hustotě snímaných plynů podle návrhu z obrázku 6.9.

**Přípravná místnost** je místo, kde dochází k manipulaci a upevňování baterie do zkušebního boxu. To způsobuje zvýšené riziko zasažení zaměstnance elektrickým výbojem. Z tohoto důvodu je na podlahu přípravné místnosti navrženo položení speciální elektroizolační rohože, která je znázorněna na obrázku 6.10, zaručuje izolaci až do 50 000 V, navíc má vysokou tvrdost a je nehořlavá.



OBRÁZEK 6.9: Lokální rozmístění detektorů

Jelikož baterie musí být při zkoušce nabita minimálně na 50% kapacity [28], je nutné mít možnost jejího nabíjení. Proto navrhujeme do přípravné místnosti umístit nabíječku na 32 A, která umožní změnu na požadovaný stav nabití. Pro případ, že bude baterie v přípravné místnosti bez dozoru, byly do přípravné místnosti navrženy detektory plynů shodně jako v prostorech skladu, tím se zaručí rychlé odhalení případného požáru.

**Vrata a vstupy** do laboratoře jsou při běžných zkouškách zamčené a otevírají se až po bezpečnostním intervalu, který je pro zkoušku stanoven. Nefunkčnost vrat, která by mohla vést k jejich zaseknutí, je riziko, jež jsme se rozhodli eliminovat, a proto jsme navrhli otevřít průjezdová vrata již před zkouškou.

### Výchozí podmínky před testem

Před testem musí být baterie upevněná přes mezirám v testovacím boxu, testovací box připevněn k hornímu části mezidílu, spodní část mezidílu musí být pevně upevněna k saním. Otočné západky musí být otočeny tak, aby obě části mezidílu byly pevně spojeny.

Senzory sledující stav baterie musí být aktivovány.

Vysokozdvihný vozík je připraven v přípravné místnosti, do níž jsou otevřené dveře. Výška



OBRÁZEK 6.10: Elektroizolační rohož

vidlí i jejich rozevření je nastaveno tak, aby odpovídali rozměrům kapes v mezidílu a bylo tak zajištěno snadné odjištění boxu. Obsluha vozíku je vybavena dýchacím přístrojem, dielektrickými rukavicemi, nehořlavým oblekem a obuví s elektrickou odolností.



### 6.5.2 Průběh samotné zkoušky

Bezprostředně před zkouškou musí být zkontrolováno následující body:

- Vysokozdvihový vozík je připraven na svém místě
- Řidič vozíku je na svém místě
- Vrata do laboratoře jsou otevřena
- Venkovní vrata jsou otevřena
- Vzduchotechnika objektu je vypnuta
- Senzorika baterie je aktivována
- Hasicí vedení je sestaveno
- Hasiči jsou pohotovosti
- Koridory jsou vyklizeny
- Okružní provoz je zastaven

Pokud jsou všechny tyto podmínky splněny, může dojít ke zkoušce. Během zkoušky se pozorují data zrychlení. Průběh zrychlení musí odpovídat tabulce 4.5, v opačném případě je zkouška vyhodnocena jako neplatná.

#### Senzorická opatření

Pro **sledování teploty** byl navržen modul pro bezdrátový přenos čtyř kanálů teploty. Zdrojem všech kanálů teploty budou termočlánky, které budou rozmístěny na různých místech baterie. Termočlánky byly zvoleny, protože mají vysoký teplotní rozsah a velmi jednoduchý princip. Modul bude mít autonomní napájecí systém bez připojení do rozvodné sítě po čase měření. Zařízení bude odolné pro nárazy o velikosti zrychlení  $400m \cdot s^{-2}$  pro minimálně 100 opakování. Dynamická zkouška baterií osobních automobilů probíhá při maximální zrychlení  $280m \cdot s^{-2}$ , zrychlení  $400m \cdot s^{-2}$  bylo zvoleno, kvůli zajištění dostatečné rezervy. Bezdrátový přenos bude mít minimální dosah 10 metrů ve volném prostoru, aby bylo možné sledovat hodnoty teplot po celou dobu manipulace s baterií a zároveň v

dostatečné vzdálenosti.

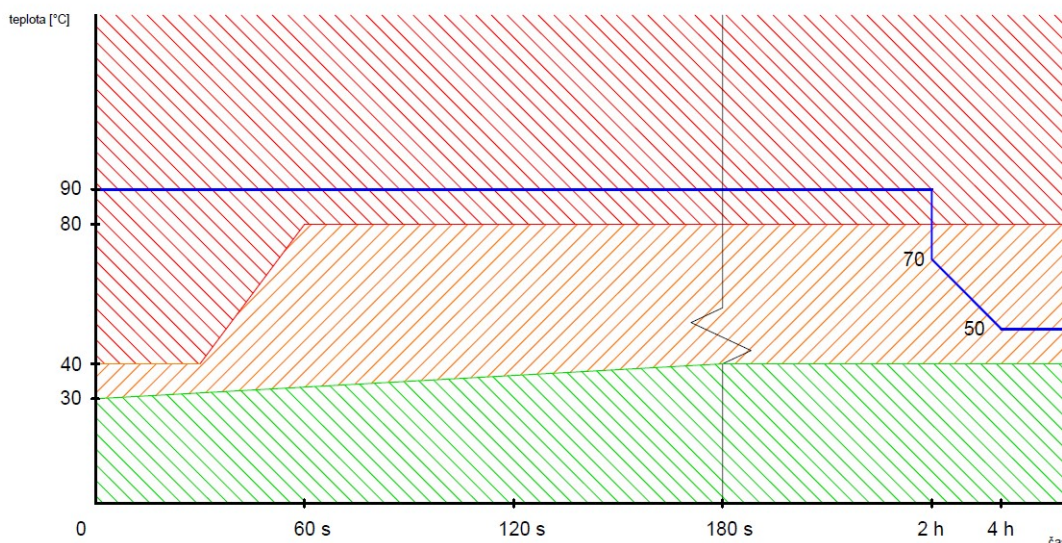
Další vyžadované sledování baterie, které je nutné pro vyhodnocení zkoušky, je sledování **akcelerace**. Akcelerace je sledována pomocí zařízení KiDAU Advanced, které je vyvíjeno společností Kistler. Jedná se o standardní vybavení laboratoře DYCOT, které je přímo určené pro CrashTest. Zařízení dokáže sbírat data až z 32 analogových a 16 digitálních kanálů z akcelerometrů nebo celých zkušebních figurín. Toto zařízení bude v průběhu testů baterií umístěno v konstrukci saní a opatřeno krytem tak, aby nemohlo dojít k jeho poškození.

### Měřené veličiny

Na základě měření teploty rozhodujeme o tom, jestli se baterie bude zaplavovat vodou, nebo ne. V diagramu na obrázku 6.11 je prostor teplota-čas rozdělen do tří oblastí. Zelenou barvou je znázorněna bezpečná oblast, oranžovou barvou oblast zvýšené opatrnosti a červenou barvou oblast ohrožení. Modrá křivka stanoví hranici zaplavování boxu vodou. Na tomto diagramu závisí procesy, které jsou popsány v odstavci 6.5.3.

Bezpečnou oblast jsem navrhl jako  $30^{\circ}\text{C}$ , později  $40^{\circ}\text{C}$ , tato čísla vychází z podmínek testovacího prostředí, ke kterým je přičtena toleranční hranice  $10^{\circ}\text{C}$ . Po 180 sekundách je tato hranice zvýšena o dalších  $10^{\circ}\text{C}$ , protože v těchto okamžicích se baterie může vyskytovat ve venkovním kontejneru, kde mohou mít vliv i klimatické podmínky.

Zóna zvýšené opatrnosti je hned nad bezpečnou oblastí a shora je ohraničena oblastí ohrožení. Přechod mezi zónou zvýšené opatrnosti a zónou ohrožení jsem v prvních 30 sekundách navrhl jako  $40^{\circ}\text{C}$ , protože pokud po tuto dobu dojde k překročení, znamená to, že je zvyšování teploty velmi rychlé, a proto nebezpečné. V dalších 30 sekundách jsem hranici lineárně zvýšil na  $80^{\circ}\text{C}$ . Tato hranice byla zvolena na základě kapitoly 5, kde se píše, že při této teplotě se začíná rozkládat elektrolyt a zvyšuje se vnitřní tlak baterie.



OBRÁZEK 6.11: Rozhodovací křivky pro zaplavování boxu

### 6.5.3 Procesy po zkoušce

Jedním z předpokladů tohoto projektu bylo, aby ihned po ukončení zkoušky došlo k evakuaci celého testovaného systému ven z prostor laboratoře. Pokud je to možné, je celé zařízení odvezeno ven z laboratoře. Scénáře, kdy nebude možné systém vyvézt z haly, budou popsány níže.

Baterie je po zkoušce umístěna ve venkovním karanténním kontejneru. Sledujeme ji pomocí termočlánků. Po dobu tohoto pozorování je na místě přítomná hasičská jednotka.

Hodinu po zkoušce, kdy skončí povinná doba pozorování baterie, nastává technická kontrola, která určí bezpečnost baterie. Jedná se o vizuální pozorování, kterým se určí vnější neporušenost baterie. Dále je měřen izolační odpor baterie. Pokud jsou oba stavy shodné se stavem před testem, můžeme považovat baterii za bezpečnou.

#### Popis evakuačních scénářů

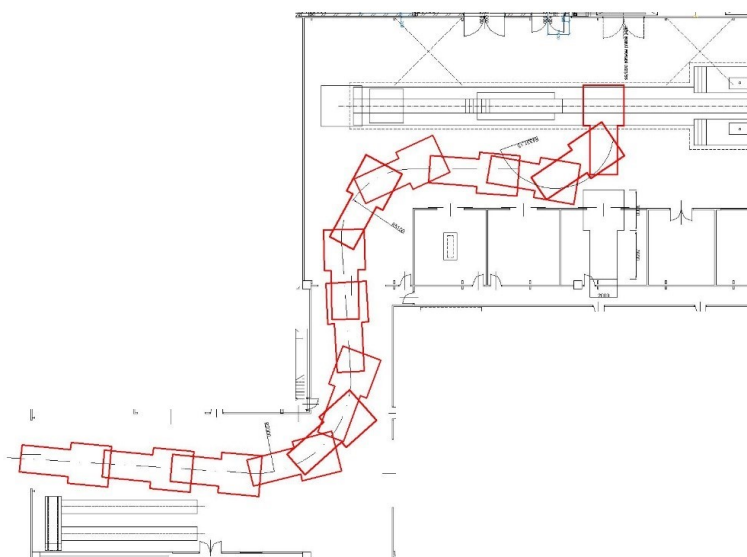
V následujících odstavcích budou popsány tři možné scénáře, do kterých se baterie může dostat. *Standardní evakuace* znamená, že celé testování probíhá bez komplikací, po celou dobu nedojde k požáru a box jde správně odepnout. *Hašení ve venkovních prostorech* znamená, že baterii bylo možné převézt do karanténního kontejneru, ale poté došlo k požáru. *Hašení ve vnitřních prostorech* je nejhorším scénářem a může k němu dojít, jen pokud baterie vzplane

za velmi krátký čas nebo pokud není možné box odepnout ze saní.

Při veškeré manipulaci s baterií po zkoušce se zároveň sleduje vývoj teploty. Pokud teplota zůstává v zelené oblasti podle obrázku 6.11, je vše v pořádku a obsluha může postupovat podle standardního scénáře. Pokud se vývoj teploty přesune do oranžové oblasti, musí se dbát zvýšené opatrnosti, ale může se i nadále postupovat podle standardního scénáře evakuace. Pokud se vývoj teploty dostane do kritické červené oblasti, je obsluha vozíku povinna okamžitě přerušit pohyb a ponechat baterii hasičské jednotce.

### Standardní scénář evakuace

Při standardním scénáři se ihned po provedení zkoušky vysokozdvizný vozík přesouvá z přípravné místnosti ke zkušebnímu boxu. Zasunutím vidlí do otvorů v mezidílu uvolní jeho horní část společně s boxem. Následně zpětným pohybem odjíždí z laboratoře a spojovací chodbou opouští budovu. Zpětný pohyb je zvolen, aby v případě zakouření baterie nedošlo k zaclonění výhledu a možné otravě řidiče. Trajektorie jízdy vozíku s boxem je naznačena na obrázku 6.12. Potom je celý přepravovaný systém umístěn do karanténního boxu. Po celou dobu je indikována teplota, kterou měří termočlánky. V tomto případě se křivka teplota-čas nepřesune z bezpečné zelené oblasti nebo se na určitou dobu ocitne v oranžové oblasti zvýšené opatrnosti, ale následně se znovu vrátí do zelené oblasti.



OBRÁZEK 6.12: Trajektorie jízdy vysokozdvizného vozíku při evakuaci

### Scénář hašení ve venkovních prostorech

Baterie buď nejeví žádné známky poškození, nebo jen v tak malém rozsahu, že je bezpečné ji vyvézt z haly. Poté, co je baterie ve venkovních prostorech, začne projevovat známky hoření a hasičská jednotka rozhodne o nutném chlazení bateriového systému vodou.

### Scénář hašení ve vnitřních prostorech

Projev baterie indikuje možný problém a vysokozdvizný vozík nemohl baterii vyvézt z haly nebo ji nemohl ani zvednout ze zkušebních saní. Hasičská jednotka využívá záložní hasební vedení pro eliminaci požáru.

### Karanténní kontejner

Karanténní kontejner byl navržen ze standardního 20 stop dlouhého lodního kontejneru, jako je na obrázku 6.13. Tento kontejner bude vybaven vanou o rozměrech 5x2x0.3 m a bude tvořit prostor na 3m<sup>3</sup> kontaminované kapaliny, která vznikne po případném hašení. Pro možnost vypouštění byl navržen vypouštěcí ventil na dně vany. V horní úrovni vany bude konstruován rošt, na který se bude box pokládat.

Kontejner bude vybaven shodnými detektory plynů jako vnitřní skladovací místo a přípravna. To zejména z důvodů následného skladování.



OBRÁZEK 6.13: Karanténní kontejner

### **Skladování po zkoušce**

Po zkoušce se uvažuje, že je baterie potenciálně nebezpečná, proto nesmí být skladována společně s ostatními, ještě netestovanými bateriemi. V návaznosti na tuto skutečnost bude baterie skladována ve venkovním karanténním kontejneru. Po ukončení sledování, které je spojené se zkouškou, bude baterie v boxu uzavřena a i nadále sledována pomocí detektorů výskytu nebezpečných plynů.

### **Procesy prováděné jen v případě požáru**

**Odpadní voda** , která vznikne při hašení baterie, je považována za kontaminovanou, a proto je potřeba zajistit její ekologickou likvidaci. V případě, že se baterie bude hasit ve venkovním kontejneru, uvažujeme jako skladovací prostor pro tuto vodu vanu vytvořenou na dně kontejneru.

Pokud dojde k hašení uvnitř zkušební laboratoře, musí se voda, která byla použita k hašení, co nejrychleji, jakmile to bude možné, přečerpat do IBC nádrží.

Následně je nutné udělat rozbor vody, který určí další nakládání s touto kapalinou. Pro rozbor vody je nutné využít akreditovanou laboratoř. Na základě protokolu o chemickém složení kapaliny ji může specializovaná firma převzít a ekologicky zlikvidovat.

Poté, co dojde k požáru a hašení uvnitř boxu, bude probíhat jeho čištění. Vše bude záviset na tom, v jakém rozsahu bude box poškozen a znečištěn. Dle toho bude určen postup čištění, případně zadána výroba nového zkušebního boxu.

### **6.5.4 Elektrická bezpečnost**

Aby mohla být dodržena elektrická bezpečnost, je nutné od zákazníka obdržet následující zařízení a dokumentaci:

- Zařízení pro dobítí baterie (interface k standardní nabíječce)
- Zařízení pro vyčítání SOC a napětí článků
- Zařízení pro vyčtení stavu hlídače izolačního stavu v baterii
- Blokové schéma zapojení baterie (zejména zapojení trakčních stykačů a hlídače izolačního stavu)

- Konektor pro připojení HV do auta s vývody cca 2m dlouhými, bez zakončení
- Datový list baterie (maximální napětí baterie, kapacita baterie, konfigurace baterie, maximální a minimální napětí článků, hmotnost baterie, body pro úchyt při manipulaci).

### **Bezpečnost při přípravě baterie**

Do styku s baterií při její přípravě před zkouškou by měly přijít pouze poučené osoby se vzděláním v elektrickém oboru, vybavené obličejovým štítem a dielektrickými rukavicemi, které odolají napětí minimálně 1000 V. Při práci s bateriovým systémem bude používáno jen nářadí určené k práci s vysokým napětím.

Prostor, kde je baterie skladována a kde dochází k její přípravě, musí být na vstupních dveřích označen výstražnou značkou *Pozor, baterie*. Ve viditelné blízkosti baterie musí být umístěna výstražná tabule *Pozor, na zařízení se pracuje, nezapínej!*.

### **6.5.5 Hasiči**

Pro zajištění bezpečnosti jsme navrhli přítomnost hasičské jednotky u každé zkoušky baterií. Jedná se minimálně o 4 hasiče: velitele zásahu, který koordinuje ostatní tři kolegy; strojník, který obsluhuje cisternu; a dva proudaři, kteří se starají o požární vedení. Všichni členové zásahového týmu jsou vybaveni nehořlavými obleky a dýchacími přístroji.

#### **Hasicí postup**

Oba proudaři jsou v průběhu zkoušky na konci svého hasebního vedení. Hasič, který obsluhuje záložní proud, je při zkoušce připraven v bezpečném prostoru za hranicí laboratoře. Při vyjždění vozíku ho následuje a je připraven kdykoliv zasáhnout. Další hasič je připraven u karanténního kontejneru. Strojník a velitel zásahu se nacházejí u hasičského vozu a jsou připravení na spuštění průtoku vody a případnou podporu.

**Hasicí postup** je následující: Hasič připojí rychlospojku hadice na hasební ventil, poté ho otevře. Dá pokyn strojníkovi, aby pustil vodu do potrubí. Na stavoznaku kontroluje množství kapaliny v boxu a při naplnění dá strojníkovi pokyn k přerušení dodávky vody.

## Kapitola 7

### Závěr

Úkolem této práce bylo připravit podmínky pro dynamické testování trakčních baterií elektrických vozidel na zkušebním zařízení firmy TÜV SÜD Czech.

Jak bylo zjištěno v rešeršní části, po poškození článků může vzniknout například následkem zkratu požár baterie, nicméně samotná konstrukce battery packu je koncipována tak, aby články a moduly baterie proti nárazu co nejvíce ochránila.

V teoretické části práce jsem se zabýval legislativními podmínkami, přičemž navrhovaná zkouška přímo vychází z předpisu EHK OSN č. 100, část 8C - Mechanický náraz. V této kapitole jsem zjistil, za jakých podmínek a jakým způsobem musí být zkouška prováděna. Bateriový systém musí být při simulaci nárazu upevněn stejným způsobem jako ve vozidle, a to pouze úchyty, které jsou k tomu určené, a baterie musí být nabita minimálně na 50% kapacity. Aby byla zkouška platná, musí být křivka závislosti zrychlení na čase ve stanovených mezích. Pro ilustraci je v příloze č. 1 anonymizovaný protokol z reálné zkoušky, kde je možné najít všechny údaje, které musí být výstupem tohoto testu.

Následně jsem se zabýval odbornými články, které zkoumaly požáry baterií a jejich chování v krizových situacích. Byly zde popsány nežádoucí situace, do kterých se baterie vlivem akcelerace a decelerace může dostat. Nejčastějším důvodem vzniku těchto situací je fyzické poškození, tepelná havárie a selhání při nabíjení a vybíjení. V této kapitole byl také popsán experiment, který prováděl Technický ústav požární ochrany. Při experimentu došlo k řízenému zapálení baterií na bázi lithia. Hlavním zjištěním bylo, že baterie při požáru



dosahovala teploty přes  $700^{\circ}\text{C}$ , ale také to, že byla poměrně snadno uhašena proudem vody.

V praktické části diplomové práce jsem řešil bezpečnostní problematiku, která se v průběhu zpracovávání projektu objevovala. Nejprve jsem se zorientoval v laboratoři, zjistil její vybavení a fyzické rozvržení. Následně byla zpracována analýza trhu baterií, na základě které byl navržen koncept zařízení, které bude složit pro uložení baterie v průběhu zkoušky. Jedná se o ocelový box a mezidíl, který slouží k upevnění na saně. Toto zařízení bylo navrženo jako bezobslužné a rychloodnímatelné pomocí vysokozdvížného vozíku, navíc bylo navrženo, aby stěny tohoto zařízení byly žáruvzdorné. Box koncipován pro případné zalití vodou a také byly navrženy senzory, které zajistí kontinuální sledování stavu baterie.

Abychom znali úroveň hrozeb jednotlivých rizikových dějů, byla zpracována analýza rizik, která určila nejvýznamnější problémy, jež mohou nastat - jsou jimi požár baterie, výbuch baterie a mechanická závada při odebírání boxu.

Bezpečnostní opatření je zapotřebí zavést již při prvním výskytu baterie v areálu laboratoří. Baterie bude po určitou dobu skladována, ale i při skladování může dojít k samovznícení. Proto byla navržena do skladovacích prostor plynová čidla, která budou baterii monitorovat. Dále bylo navrženo, aby při každé zkoušce baterií byla na místě přítomna hasičská jednotka, také bylo určeno rozmístění jednotlivých požárníků a postup hašení. Pro skladování po zkoušce byl navržen karanténní kontejner, do kterého bude umístěna baterie i se zkušebním boxem ihned po zkoušce.

Nakonec byla navržena opatření pro zajištění elektrické bezpečnosti - jedná se o značení prostor, kde se bude baterie nacházet, a o ochranné pomůcky, jimiž musí být vybaveni pracovníci, kteří přijdou do kontaktu s baterií.

V momentě, kdy odevzdávám tuto diplomovou práci, jsou všechny mé úkoly na tomto projektu dokončeny a výpočetní středisko dokončuje poslední úpravy konstrukce mechanismu. Pro umožnění testování bateriových systémů v laboratořích TUV SÚD zbývá už jen rozhodnutí o provedení investice.

# Literatura

- [1] F. Vlk. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Sv. 234 s. Prof. Ing. František Vlk, DrSc. nakladatelství a vydavatelství, 2004.
- [2] M.S. Kumar. *Development scheme and key technology of an electric vehicle: an overview*. 2017.
- [3] B. Chatain. *CO2: Parlament schválil nové emisní limity pro osobní auta a dodávky*. 2019. URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/press-room/20190321IPR32112/co2-parlament-schvalil-nove-emisni-limity-pro-osobni-auta-a-dodavky>.
- [4] A. Vaughan A. Chrisafis. *France to ban sales of petrol and diesel car by 2040*. URL: <http://www.theguardian.com/business/2017/jul/06/france-ban-petrol-diesel-car-2040-emmanuel-macron-volvo> (cit. 24. 04. 2018).
- [5] K. T. Chau. *Electric vehicles machines and drives design, analysis and application*. Sv. 400 s. John Wiley a Sons Singapore Pte. Ltd., 2015.
- [6] T. Hartman G. Levi E. Foschi. "Indication of anomalous heat energy production in a reactor device". In: *KTH Royal Institute of Technology* (2013).
- [7] S. Greenwood. *Hybrid Vehicles - a simple guide*. 2017. URL: <https://www.aathornton.com/hybrid-vehicles-simple-guide/>.
- [8] R. Xiong. *Advanced battery management technolgis for electric vehicles*. Sv. 256 s. John Wiley a Sons Singapore Pte. Ltd., 2019.
- [9] J. Mík. "Jízdní odpory". In: *Dynamika jízdy vozidla*.
- [10] T. Vítů Z. Malá D. Nováková. *Fyzika I*. Praha: ČVUT, 2009.
- [11] K.T.Chau C.C. Chau. *Modern Electric Vehicle Technology*. Oxford: Oxford University Press, 2001.

- [12] E.G. Giakoumis. *Driving and Engine Cycles*. Switzerland: Springer, 2017.
- [13] VW. *WLTP: Nové standardy pro spotřebu*. 2017. URL: <https://www.volkswagen.cz/znacka-a-technologie/wltp>.
- [14] A. Hussain M.A. Hannan M.S.H. Lipu. "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations". In: (2017).
- [15] P. Baca P. Krivik. "Eletrochemical Energy Storage". In: *IntechOpen* (2013).
- [16] Battery University. *Types of Lithium-ion*. 2017. URL: [www.batteryuniversity.com](http://www.batteryuniversity.com).
- [17] *Olověné baterie*. 2017. URL: <http://elektromobil.vseznamu.cz/baterie-v-elektromobilech/oloveny-akumulator>.
- [18] Desulfatace. *Sulfatace akumulátorů*. 2020. URL: <https://www.desulfatace.cz/sulfatace-akumulatoru/>.
- [19] *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003.
- [20] P. Vytlačil. *Recyklace Li-ion baterií*. 2018. URL: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/recyklace-lithium-ion-baterii-uvod>.
- [21] G. Stout D. Stephens P. Shawcross. "Lithium-ion Battery Safety Issues for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles". In: *National Highway Traffic Safety Administration* (2017).
- [22] K.C. Colwell. *The Current Condition and Future Potential of Automotive Batteries - Tech Dept*. 2011. URL: <https://auvac.org/newsitems/view/1082>.
- [23] L. Hollmotz. "Safety of Lithium ion batteries in vehicles - state of the art, risks and trends". In: *23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicels*.
- [24] A. A. Pesaran D.H. Doughty. "Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance". In: *NREL* (2012).
- [25] *Zkoušení automobilů a motocyklů*. S a T CZ s.r.o., 2008.
- [26] United Nations Economic Commission for Europe. *Introduction*. 2020. URL: <https://www.unece.org/leginstr/cover.html>.

- [27] TÜV SÜD. *What revision 2 of ECE-R100 means for rechargeable battery manufacturers*. 2018. URL: <https://www.tuvsud.com/en/e-ssentials-newsletter/past-topics/what-revision-2-of-ece-r100-means-for-rechargeable-battery-manufacturers>.
- [28] Organizace spojených národů. *Jednotná ustanovení pro schvalování bateriových elektrických vozidel z hlediska zvláštních požadavků na konstrukci, funkční bezpečnost a emise vodíku*. Předpis č. 100. 2016.
- [29] P. Gustafsson D. Sturk. *High Risk E. Vehicle Battery Sled Testing*. 2019. URL: <https://www-esv.nhtsa.dot.gov/Proceedings/24/files/24ESV-000248.PDF>.
- [30] O. Suchý. "Chování lithiových baterií a hořlavých kovů za zvýšených teplot, v podmínkách požáru a způsoby jejich hašení". In: *Výzkum efektivnosti hasiv*.
- [31] Instron. *CSAadvanced*. 2020. URL: <https://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/crash-simulation/csa>.
- [32] TÜV SÜD Czech. *Dynamické testování komponentů - DYCOT*. 2017. URL: <https://www.tuv-sud.cz/uploads/images/1535533615659923220089/dycot-screen.pdf>.
- [33] A. Kafková. "Upevňovací systém pro testování baterií elektrovozidel". Dipl. ČVUT, FS, 2019.

**Test report No: 18/061**  
Test according to ECE 100/02

**Producer:** ŠKODA ELECTRIC a.s.  
Tylova 1/57  
301 28 Plzeň


**Applicant:** TÜV SÜD Czech s.r.o.  
Novodvorská 994 / 138  
Praha 4  
142 21  
Czech Republic

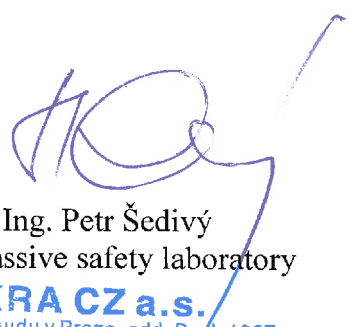
**Subject of test:** Test of battery block according to ECE 100/02 appendix  
8C – Mechanical shock

**Type:** Battery block TBS5.1-17

**Submitted for tests:** 21. 03. 2018

**Test performed:** 22. 03. 2018

  
**Prepared by:** Ing. Jakub Křivský  
Testing engineer

  
**Authorized by:** Ing. Petr Šedivý  
Head of passive safety laboratory

**Issue date:** 28. 03. 2018

**Copy number:** 1.

**DEKRA CZ a.s.**  
zaps. u Měst. soudu v Praze, odd. B, vl. 1967  
149 00 Praha 4, Tůrkova 1001  
IČO: 49240188 DIČ: CZ49240188  
(21)

**This document contains:** 8 pages + data CD

*Test results are only available for the material submitted to tests  
This document may only be reproduced in the form of a full photographic facsimile.*

**1. ECE 100/02, Annex 8C**

(further numbering system is according ECE 100/02 paragraphs)

**2. Instalation:**

2.1 Complete REESS

2.2 Connection by producer manual, according to using in the vehicle

**3. Procedures:**

3.1 a) testing temperature 21,0°C

b) SOC – 100%

c) done

3.2 Vehicle category M3 (deceleration test):

Figure 1  
Generic description of test pulses

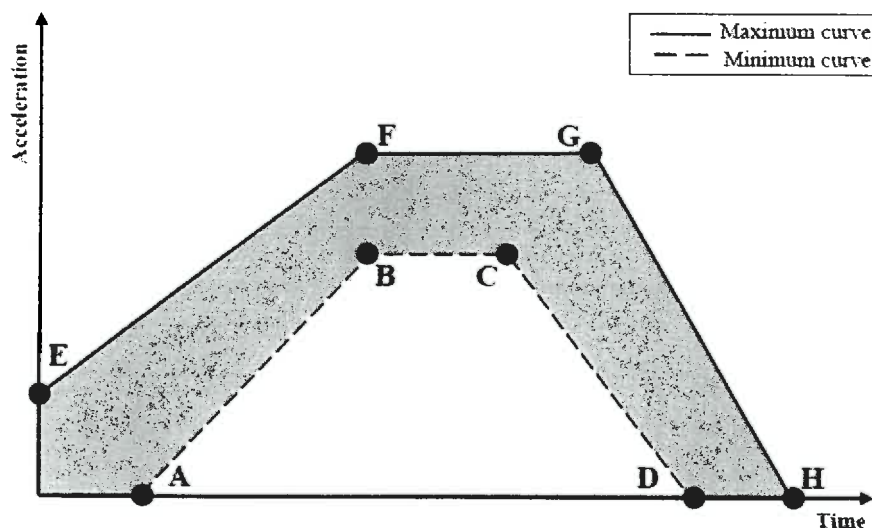


Table 3 for M<sub>3</sub> and N<sub>3</sub> vehicles:

Point	Time (ms)	Acceleration (g)	
		Longitudinal	Transverse
A	20	0	0
B	50	6.6	5
C	65	6.6	5
D	100	0	0
E	0	4	2.5
F	50	12	10
G	80	12	10
H	120	0	0



Two directions of the impact:

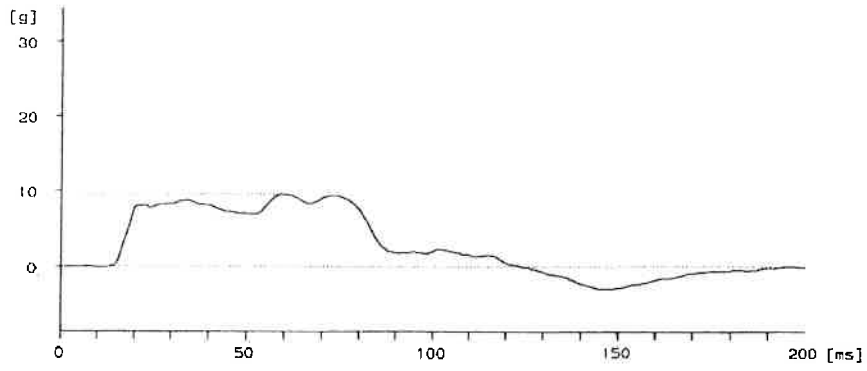
Transverse (test No. 18/061-01)

Condition after test:



Deceleration curve:

1806101/1



2. Accel.  
max. 9.6





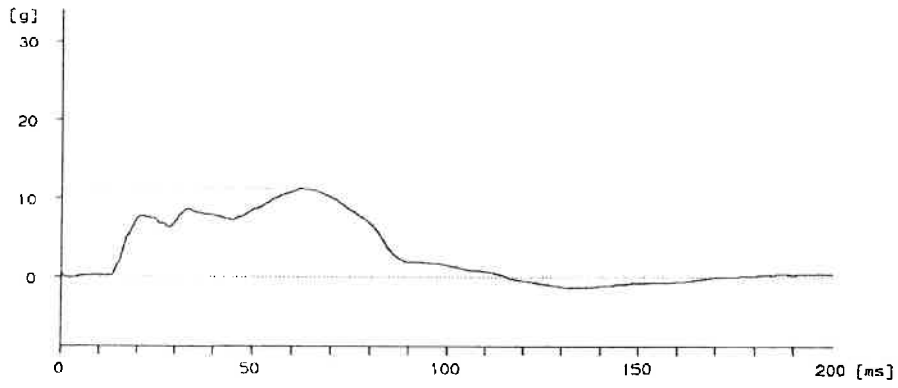
Longitudinal (test No. 18/061-02)

Condition after test:



Deceleration curve:

1806102/1



2. Accel.  
max. 11.3



Observation:

The period: 1 hour, temperature condition: 21,0°C, all results of the battery condition see table below.

Transverse test:

Time [minutes]	Battery voltage [V]	Electrical contact resistance [GΩ]		Battery temperature [°C]
		Rp+	Rp-	
before	423,7	20	20	21,0
0	423,7	20	20	21,0
+ 15	423,8	20	20	21,0
+ 30	423,8	20	20	21,0
+ 45	423,7	20	20	21,0
+ 60	423,7	20	20	21,0

Longitudinal test:

Time [minutes]	Battery voltage [V]	Electrical contact resistance [GΩ]		Battery temperature [°C]
		Rp+	Rp-	
before	423,6	20	20	22,5
0	423,7	20	20	23,0
+ 15	423,7	20	20	22,0
+ 30	423,7	20	20	22,0
+ 45	423,7	20	20	21,0
+ 60	423,7	20	20	21,0

Acceptance criteria (ECE 100/02, par. 6.4.1.3):

- a) fire NO
- b) explosion NO
- c) tested device is in the same condition and position, protection degree IPXXB is fulfilled, without any electrolyte leakage

(end of the numbering system according ECE 100/02 paragraphs)



## 2. Conclusion:

Battery box type Battery block TBS5.1-17 meets ECE 100/02 par. 6.4.1.2 (annex 8C) and related requirements in ECE 100/02 par. 6.4.1.3.

### Details of the testing sample:

Type: Battery block TBS5.1-17

S. No.: 65R84156

Weight: 675 kg

## 3. Testing device:

- Dynamic sled for deceleration impact test (DEKRA device)
- Two high speed cameras (Redlake HG-100 s.No. 150434, Photron Fastcam Mini s.No. 10311405022)
- Acceleration sensor + amplifier filter unit (B12/1000 s.No. 45164 + MIRSCH i.No. 20030053)
- Speed meter (USMD e.No. 3130042)
- Measuring system for REESS checking (Škoda Electric measurement)

