



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Upevňovací systém pro testování baterií elektrovozidel

Alžběta Kafková

Praha 2019

„Prohlašuji, že tato práce je mým původním autorským dílem. Veškerá literatura a další zdroje, z nichž jsem při zpracování čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a v práci jsou řádně citovány.“

Praha 9. 6. 2019

.....

Poděkování

Děkuji panu Ing. Janovi Zavřelovi, Ph.D. za odborné vedení práce. Dále děkuji panu Ing. Jakobovi Jelínkovi a celému oddělení CAS společnosti TUV SUD Czech s.r.o. za pomoc při řešení dílčích úloh diplomové práce, za všechny cenné rady a připomínky i poskytnuté technické zázemí. Zvláště pak děkuji panu Ing. Petrovi Zárubovi za praktické rady a připomínky v oblasti konstruování i výpočtů.

Anotace

Jméno autora:	Bc. Alžběta Kafková
Název diplomové práce:	Upevňovací systém pro testování baterií elektrovozidel
Anglický název:	Mounting system for testing electric vehicle batteries
Akademický rok:	2018/2019
Ústav:	U 12105 – Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Jan Zavřel, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran 70 počet obrázků 49 počet tabulek 5

Klíčová slova: lithium – iontové baterie, elektrická vozidla, bezpečnost lithium – iontových baterií, testování na mechanický náraz, normy, napětí

Key words: lithium ion batteries, electric vehicle, safety of lithium ion batteries, mechanical shock test, standards, tension

Abstrakt

Tato diplomová práce popisuje strukturu a vlastnosti lithium – iontových baterií určených do elektrovozidel. Stručně popisuje opatření pro zvýšení bezpečnosti jejich provozu. Dále zde nalezneme přehled norem pro testování lithium – iontových baterií na mechanický náraz. Práce zároveň prezentuje návrh mechanismu pro upevnění baterií určených k testování na mechanický náraz, včetně návrhu konstrukce a pevnostních výpočtů.

Abstract

My thesis discusses the structure and features of lithium-ion batteries used in electric vehicles and also concludes regulations for their safe use. Additionally, I enclosed a list of recommended standards for the mechanical shock test. At the same time I collaborated on the computing part and I proposed construction to fix batteries during the mechanical shock test.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kafková** Jméno: **Alžběta** Osobní číslo: **434270**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Mechatronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Upevňovací systém pro testování baterií elektrovozidel

Název diplomové práce anglicky:

Mounting system for testing electric vehicle batteries

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši vlastností baterií používaných v elektrovozidlech a jejich bezpečnostních systémů
- 2) Seznamte se s příslušnými normami mechanického rázu testování baterií, monitoringem jejich stavu, bezpečností a vyhodnocením zkoušek.
- 3) Navrhněte uchycení a uvolnění upevňovacího systému pro testování baterií.
- 4) Pro navržené řešení proveďte pevnostní výpočty a navrhněte měřicí elektroniku a použití senzorů vhodných pro reálné testování.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Deng J., Bae Ch., Marcicki J., Masias A., Miller T. (2018): Safety modelling and testing of lithium-ion batteries in electrified vehicles. Nature Energy, Volume 3, p. 261–266.
- [2] Pontus Svens (2014): Methods for Testing and Analyzing Lithium-Ion Battery Cells intended for Heavy-Duty Hybrid Electric Vehicles. Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology Applied Electrochemistry, Department of Chemical Engineering and Technology, Sweden.
- [3] Bing Xia, Chris Mi, Zheng Chen, Brian Robert (2015): Multiple cell lithium-ion battery system electric fault online diagnostics. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). ISBN 978-1-4673-6741-7

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Zavřel, Ph.D., odbor mechaniky a mechatroniky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **16.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce:

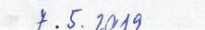

Ing. Jan Zavřel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.


7.5.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studentky

OBSAH

1. SEZNAM TABULEK	8
2. SEZNAM OBRÁZKŮ	9
3. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	11
4. ÚVOD	13
5. CÍLE PRÁCE	14
6. TEORETICKÁ ČÁST	15
6.1 Vymezení základních pojmů	15
6.2 Lithium – iontové baterie	15
6.2.1 Složení a struktura Lithium – iontových baterií.....	17
6.2.2 Princip funkce Lithium – iontových baterií.....	18
6.3 Bezpečnostní opatření na úrovni článků	19
6.4 Battery management system (BMS)	20
6.4.1 Funkce BMS.....	21
6.4.2 Blokové uspořádání BMS.....	21
6.5 Chlazení a přetlakové ventily.....	24
6.6 Charakteristika selhání baterií.....	24
6.7 Testování baterií.....	25
6.8 Testování baterií na mechanický náraz	26
6.9 Mechanický náraz dle UN/ECE-R100.02:2013 (EHK 100).....	26
6.10 Mechanický náraz dle ostatních norem	28
6.11 Bezpečnostní opatření.....	29
6.11.1 Bezpečnostní opatření před testováním baterií.....	29
6.11.2 Bezpečnostní opatření během testování baterií a po ukončení testování baterií.....	29
6.12 Požár Lithium - iontových baterií	30
6.12.1 Růst teploty baterie a následné vznícení	30

6.12.2	Požár elektrických vozidel versus požár konvenčních vozidel.....	31
6.13	Hašení Lithium – iontových baterií.....	33
6.14	Bezpečnost Lithium – iontových baterií	35
7.	PRAKTICKÁ ČÁST	36
7.1	Zadání a analýza problému.....	36
7.2	Návrhy řešení.....	37
7.3	Návrhy mechanických řešení	39
7.4	Výsledný návrh mechanického řešení.....	43
7.5	Konstrukce výsledného řešení	47
7.5.1	Kritická místa konstrukce.....	47
7.5.2	Přednosti konstrukce	47
7.6	Návrhové výpočty konstrukce	47
7.7	Pevnostní výpočty konstrukce	50
7.7.1	První výpočet – podélný box.....	53
7.7.2	Závěrečný výpočet – podélný box.....	56
7.7.3	První výpočet – příčný box.....	57
7.7.4	Závěrečný výpočet – příčný box.....	59
7.8	Konstrukce po provedení úprav na základě výpočtů	61
7.9	Měřicí elektronika	64
7.9.1	Hlídač izolačního stavu.....	64
7.9.2	Teplotní čidla	65
7.9.3	Data logger	65
7.9.4	Měřič izolačního odporu	66
	ZÁVĚR.....	67
8.	POUŽITÁ LITERATURA.....	68

1. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Srovnání vlastností Lithium – iontových baterií s jinými druhy baterií [6].	16
Tabulka 2 Meze akcelerace/decelerace při testování dle normy EHK 100 [2].	27
Tabulka 3 Přehled zdravotních rizik, materiálové inkompatibility a hořlavosti komponent Li – iontových baterií [4].	32
Tabulka 4 Přehled zdravotních rizik, materiálové inkompatibility a hořlavosti vedlejších komponent vznikajících při thermal runaway Li – iontových baterií [4].....	33
Tabulka 5 Požadavky na ventilaci a množství vody potřebné k hašení Li – iontových baterií [21].	34

2. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Zobrazení článku, modulu a bateriového systému [4].....	15
Obrázek 2 Struktura bateriové buňky Li – iontové nabíjecí baterie [8].....	17
Obrázek 3 Řez válcovým spirálově vinutým Li – iontovým válcovým článkem [8].....	18
Obrázek 4 Li – iontová baterie pro EV po propuknutí thermal runaway [7].....	19
Obrázek 5 Schematické znázornění jednotlivých typů článků dle vnitřního uspořádání. Válcové články (vlevo), prizmatické články (uprostřed), sáčkové články (vpravo) [15].	20
Obrázek 6 Schematické zobrazení článků, modulů a kontrolní elektroniky v bateriovém systému [5].....	20
Obrázek 7 Ilustrace struktury a fungování BMS [18].....	21
Obrázek 8 Blokový diagram BMS [6].....	24
Obrázek 9 Schéma příčin a důsledků selhání baterií [7].	25
Obrázek 10 Zobrazení pásma průběhu akcelerace/decelerace při testování dle normy EHK 100 [2].....	27
Obrázek 11 Schematické zobrazení procesu testování baterie.	30
Obrázek 12 Zobrazení průběhu požáru Li – iontových baterií při testování proti ohni; 1- zapálení baterie propanovým hořákem, 2 - vzplanutí baterie, 3 - průběh požáru po odstranění hořáku, 4 - průběh požáru po zahájení hašení [22].....	35
Obrázek 13 Přehled základních principů mechanismů použitelných k upevnění boxu k saním.	37
Obrázek 14 Možnosti využití pneumatických principů [25]–[28].	38
Obrázek 15 Možnosti využití mechanických principů.....	38
Obrázek 16 Návrh číslo 1; hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.....	40
Obrázek 17 Návrh číslo 1 (nalevo – bez boxu, napravo – v řezu); hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.....	40
Obrázek 18 Návrh číslo 2; hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.....	41
Obrázek 19 Návrh číslo 2 – řez; hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.....	41
Obrázek 20 Návrh číslo 3; hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.....	42
Obrázek 21 Návrh číslo 3; (nalevo – bez boxu, napravo – v podélném řezu); hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.....	42
Obrázek 22 Návrh uchycení boxu k saním – podélný směr.	43
Obrázek 23 Návrh uchycení boxu k saním – příčný směr.	44
Obrázek 24 Zobrazení prvků, které jsou pevně uchyceny k saním.	44
Obrázek 25 Zobrazení uložení rámu na saně.....	45
Obrázek 26 Zobrazení uložení rámu na saně, zajištění pomocí západek.....	45
Obrázek 27 Řez rámem v průběhu odjíždění pomocí vidlí vysokozdvížného vozíku.....	46
Obrázek 28 Návrh konstrukce boxu.	46

Obrázek 29 Materiálová křivka oceli S355.....	50
Obrázek 30 Nastavení kontaktu typu 33.....	52
Obrázek 31 Nastavení kontaktu typu 36.....	52
Obrázek 32 Rám – první výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.	54
Obrázek 33 Rám – první výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí, deformace 10x zvětšené.....	54
Obrázek 34 Detail rámu, čepy – první výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.	55
Obrázek 35 Detail rámu, západky – první výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.	55
Obrázek 36 Rám – poslední výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.	56
Obrázek 37 Detail rámu, čepy – poslední výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.	57
Obrázek 38 Detail rámu, západky – první výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.	57
Obrázek 39 Rám – první výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.	58
Obrázek 40 Čelo rámu – první výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.	59
Obrázek 41 Detail rámu - čepy a místo uchycení boxu – první výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.	59
Obrázek 42 Rám – poslední výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.	60
Obrázek 43 Čelo rámu – poslední výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.	60
Obrázek 44 Detail rámu - čepy a místo uchycení boxu – poslední výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.	61
Obrázek 45 Finální návrh konstrukce rámu.....	62
Obrázek 46 Finální návrh konstrukce rámu – detail.....	62
Obrázek 47 Finální návrh konstrukce boxu.....	63
Obrázek 48 Finální návrh konstrukce boxu – řez.....	64
Obrázek 49 Finální návrh konstrukce boxu – řez, detail.....	64

3. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ZKRATKA	VÝZNAM ZKRATKY	ČESKÝ VÝZNAM
BMS	<i>Battery management system</i>	Systém správy baterie
CFM	<i>Cubic feet per minute</i>	Kubická stopa za minutu
DUT	<i>Device under test</i>	Testované zařízení
ECU	<i>Electronic control unit</i>	Elektronická řídicí jednotka
EDLC	<i>Electrostatic double-layer capacitor</i>	Elektrostatický dvojvrstvý kondenzátor
EV	<i>Electric vehicles</i>	Elektrická vozidla
GPM	<i>Gallons per minute</i>	Galon za minutu
ICE	<i>Internal combustion engines</i>	Spalovací motor
IEC	<i>International Electro technical commission</i>	
IIHS	<i>Insurance institute for highway safety</i>	
ISO	<i>International organisation for standardization</i>	
Li-ion	<i>Lithium-ion battery</i>	Lithium – iontové baterie
RESS	<i>Rechargeable energy storage system</i>	Nabíjecí zásobník energie
SAE	<i>Society of automotive Engineers</i>	
SOC	<i>State of Charge</i>	Dostupný elektrický náboj vyjádřený jako procento jmenovité kapacity
SOH	<i>State of health</i>	Životnost baterie
UL	<i>Underwriters Laboratories</i>	
UN	<i>United Nations</i>	

ZKRATKA	NÁZEV SLOUČENINY
C	<i>Grafit</i>
CO	<i>Oxid uhelnatý</i>
CO ₂	<i>Oxid uhlíčitý</i>
HCl	<i>Chlorovodík</i>
HCN	<i>Kyanovodík</i>
HF	<i>Fluorovodík</i>
LCO/ LiCoO ₂	<i>Lithium-kobalt oxid</i>
LiC ₆	<i>Lithium grafit</i>
LiF	<i>Fluorid lithný</i>
LiFePO ₄	<i>Lithium-železo fosfát</i>
LiMn ₂ O ₄	<i>Lithium-mangan oxid</i>
LiPF ₆	<i>Hexafluorofostát</i>
LTO	<i>Lithium-titan oxid</i>
NO	<i>Oxid dusnatý</i>
NO ₂	<i>Oxid dusičitý</i>
POF ₃	<i>Oxofluorid fosforečný</i>

4. ÚVOD

Osobní automobily, nákladní automobily a autobusy podstatně usnadňují naše každodenní životy. Jejich spalovací motory se však významně podílejí na znečišťování ovzduší. Dle *Union of Concerned Scientist* uvolňují automobily a autobusy více než polovinu celkového množství oxidu dusíku, který velkou mírou přispívá ke znečištění životního prostředí; oxid dusičitý se podílí na vzniku kyselých dešťů nebo tvorbě přízemního ozonu a tzv. fotochemického smogu, oxid dusnatý je jedním ze skleníkových plynů a hraje tak důležitou roli v otázce globálního oteplování. Negativně mohou ovlivnit i lidské zdraví, což se projeví především podrážděním dýchacích cest.

Ačkoliv si tedy život bez dopravních prostředků neumíme představit, jejich využití představuje velkou zátěž pro životní prostředí. Automobily s hybridním nebo elektrickým pohonem jsou jedním možným řešením tohoto problému.

Využití elektromobilů v posledních letech postupně stoupá. V roce 2004 tvořily automobily s hybridním nebo elektrickým pohonem ve Spojených státech 1 % z celkového počtu prodaných automobilů. V roce 2013 prodej automobilů s hybridním a elektrickým pohonem tvořil už celá 4 % z celkového množství prodaných automobilů [1].

Zavedení elektrovozidel na trh s sebou však přináší řadu zcela nových bezpečnostních rizik, která u dopravních prostředků se spalovacími či zážehovými motory nehrozila. Mezi hlavní bezpečnostní rizika patří nebezpečí úrazu elektrickým proudem, nebezpečí vzniku požáru a nebezpečí úniku elektrolytu. Z tohoto důvodu tedy vznikají návrhy nových testů a zkoušek určených speciálně pro elektrovozidla. Některé z těchto zkoušek probíhají na celých automobilech, některé na jejich subsystémech.

Jedním z přísně tetovaných subsystémů je RESS (Rechargeable energy storage). V současné době je RESS nejčastěji testován proti selhání vlivem vibrací, tepelného šoku, mechanického nárazu, mechanického porušení, zkratu, přehřátí, přebití nebo naopak nadměrného vybití.

Dopravní prostředky s elektrickým pohonem představují v současné době jediné reálné řešení, jak snížit emise výfukových plynů. Přinášejí však řadu bezpečnostních rizik, které bude v budoucnu nutno omezit případně zcela odstranit.

5. CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je na základě odborné literatury popsat Lithium – iontové baterie používané v elektrovozidlech a jejich testování na mechanický náraz. Dále navrhnout konstrukci pro testování baterií na mechanický náraz za specifických podmínek a provést její pevnostní analýzu. Navrhnout vhodné senzory pro sledování stavu baterie během jejího testování.

6. TEORETICKÁ ČÁST

6.1 Vymezení základních pojmů

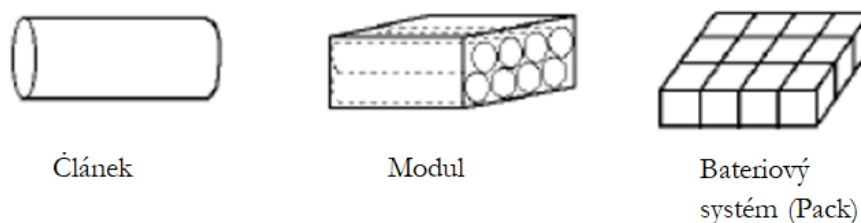
Článek – zapouzdřený elektrochemický celek s alespoň jednou kladnou a druhou zápornou elektrodou, mezi kterými je napěťový rozdíl [2].

Modul – sdružení propojených článků (paralelně nebo sériově) do jedné jednotky [3].

Bateriový systém (Pack) – sdružení propojených modulů včetně elektronického řízení a všech pomocných subsystémů pro mechanickou a tepelnou ochranu [3].

Článek, modul a bateriový systém jsou zobrazeny níže na obrázku 1.

V této práci je termín baterie používán pro označení bateriového systému.



Obrázek 1 Zobrazení článku, modulu a bateriového systému [4].

6.2 Lithium – iontové baterie

Lithium – iontové (Li – iontové) baterie jsou v současnosti využívány v mobilních telefonech, laptotech, fotoaparátech nebo v elektromobilech. Podmínky, kterým jsou vystaveny baterie v elektrických vozidlech (EV), jsou však výrazně náročnější než podmínky, kterým jsou vystaveny baterie v drobné elektronice. Baterie určené pro EV musí být odolné vůči nadměrnému nabití/vybití, zkratu, mechanickému nárazu, šíření ohně, teplotním extrémům nebo působení zrychlení a vibracím. Článek baterie pro EV navíc musí poskytovat vysoké napětí (4 až 6 V), velké množství energie a vyznačovat se dlouhou životností. Vývoj bezpečných vysoko kapacitních baterií pro EV je proto velkou výzvou. Dvě hlavní snahy ve vývoji baterií pro EV jsou: snížit riziko vzniku poruchy a omezit šíření již vzniklého požáru v bateriovém modulu na minimum. Toho lze dosáhnout především zvýšením tepelné stability baterie [5].

V níže uvedené tabulce 1 je přehled vlastností Li – iontových baterií a jejich srovnání s ostatními běžně používanými bateriemi.

	Teplota prostředí [°C]	η [%]	Energie [Wh/kg]	Výkon [W/kg]	Napětí [V]	Samovybíjení [%/měsíc]	Počet cyklů za život	Odhad ceny	
								[\$ /kWh]	[\$ /kW]
Olovené baterie	-30-60	85	20-40	300	2,1	4-8	200	150	10
NiMH	-20-50	80	40-60	1300-500	1,2	20	>2500	500	20
Li - ion	-20-55	93	100-200	3000-800	-3,6	1-5	<2500	800	50-75
EDLC	-30-65	97	5-20	1500	-2,5	30		2000	50

Tabulka 1 Srovnání vlastností Lithium – iontových baterií s jinými druhy baterií [6].

Výhody Li – ion baterií:

- Tvořeny uzavřenými články (není nutná výměna elektrolytu)
- Dlouhá životnost (přibližně 10 let)
- Schopnost rychlého nabití/vybití ve srovnání s ostatními druhy baterií
- Vysoká hustota energie (přibližně 120 Wh/kg)
- Bez paměťového efektu (na rozdíl od nikl – kadmiových baterií)
- Nízká rychlost samovybíjení [4]

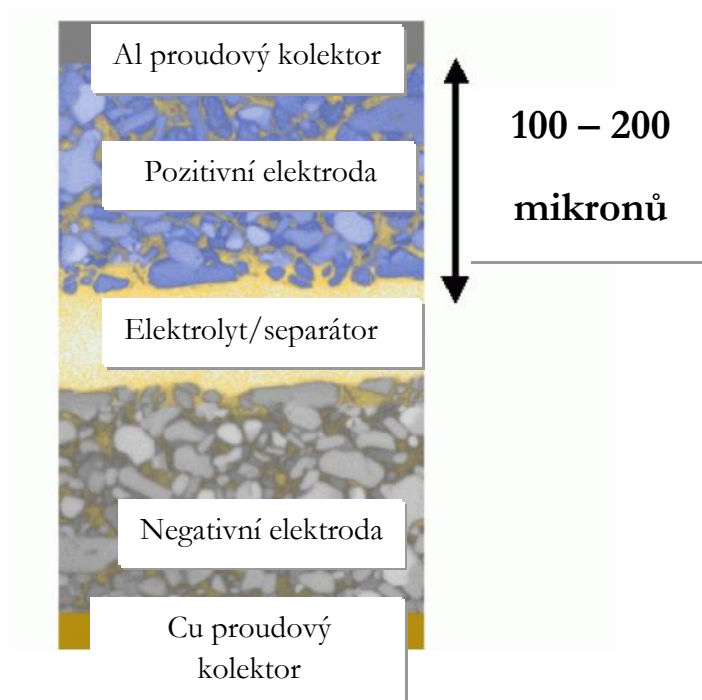
Nevýhody Li – ion baterií:

- Vyšší cena než ostatní běžně používané baterie
- Degradace při vysokých teplotách
- Možnost thermal runaway¹ a úbytku kapacity při přebití
- Tepelná nestabilita při rychlém nabíjení a nízké teplotě <0 °C (může vést až k thermal runaway)
- Potřeba komplexního bezpečnostního systému[4]

¹Thermal runaway – stav, kdy vzestup teploty baterie způsobený vnějším nebo vnitřním zdrojem tepla způsobuje řetězec chemických reakcí a zkratů, které vedou k dalšímu nekontrolovatelnému růstu teploty v baterii

6.2.1 Složení a struktura Lithium – iontových baterií

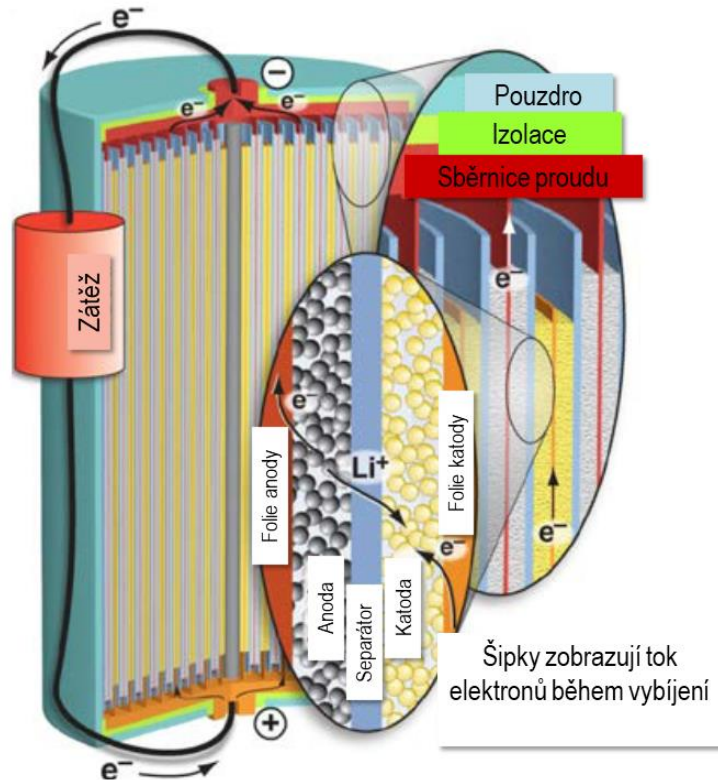
Li – iontové baterie (obrázek 2, obrázek 3) obsahují oxidant (katodu) a palivo (anodu a elektrolyt) uzavřené v jednom článku. Kombinace oxidantu i paliva se vzhledem k vysokému riziku vzniku požáru používá jen v aplikacích, kde je nezbytně nutné uchovávat velké množství energie při co nejmenších rozměrech a hmotnosti baterie. [7].



Obrázek 2 Struktura bateriové buňky Li – iontové nabíjecí baterie [8].

U většiny baterií pro EV je katoda vyrobena z oxidu kovu lithia (např. LiCoO_2). Katody tohoto složení mají vysokou kapacitu, reaktivitu a nízkou tepelnou stabilitu. Materiál anody je vždy vybírán tak, aby měla baterie vysokou kapacitu a nízkou nevratnou ztrátu při cyklickém nabíjení a vybíjení. Nejčastěji bývá anoda uhlíková a v poslední době se objevují i lithium titanové anody (LTO) [9]. Celkové chování baterie je vždy závislé na kombinaci katody a anody [5]. Konkrétní kombinace ovlivňuje tepelnou stabilitu, životnost, průběh nabíjení a vybíjení a chování při vnějším fyzickém poškození baterie [10].

Elektrolyt používaný v Li – iontových bateriích má organický základ. Tento elektrolyt umožňuje použití lithiového grafitu (LiC_6) jako anodické aktivní složky, což vede ke vzniku baterií s vysokou hustotou energie. Nevýhodou organických elektrolytů je však vysoká těkavost a hořlavost, která je velkým bezpečnostním rizikem [5] [11].



Obrázek 3 Řez válcovým spirálově vinutým Li – iontovým válcovým článkem [8].

6.2.2 Princip funkce Lithium – iontových baterií

Během vybíjení je aktivní materiál katody (oxidant) redukován a aktivní materiál anody (palivo) oxidován. Energie uvolňovaná během tohoto procesu je přímo úměrná rozdílu elektromotorického napětí mezi dvěma elektrodami. Nejvyššího napětí se podařilo dosáhnout mezi lithiovou anodou a katodou z fluoridu mědi. Toto napětí bylo přibližně 6,5 V [5].

Při běžném používání baterie je chemická energie článku přeměňována na elektrickou a naopak. Při této přeměně se z baterie uvolňuje minimální množství tepla a plynu. Pokud však dojde k narušení tohoto procesu a oxidant s palivem baterie spolu začnou reagovat, dochází k uvolňování vysokého množství tepla a plynů. Zahřátím jednoho bateriového článku dojde k zahřátí článku okolních [5]. Pokud jsou články zahřáty na teplotu 170 až 250 °C je v nich spuštěna chybná chemická reakce – thermal runaway. Možnost zastavit thermal runaway je téměř nulová, protože rychlost vzniku tepla vzrůstá exponenciálně, zatímco rychlost disipace tepla pouze lineárně. Během thermal runaway je produkováno velké množství kouře, jak je znázorněno na obrázku 4 [12].



Obrázek 4 Li – iontová baterie pro EV po propuknutí thermal runaway [7].

6.3 Bezpečnostní opatření na úrovni článků

Jako ochrana proti thermal runaway jsou často používány separátory. Separátory jsou speciální látky, které jsou umístěny mezi katodou a anodou. Mají dobrou iontovou vodivost, ale špatnou elektronovou vodivost. Bývají tvořeny velmi tenkou vrstevnatou membránou s tloušťkou mezi 10 a 40 μm a s vysokou porozitou, která minimalizuje pokles iontové vodivosti způsobený přítomností membrány [4][7]. Jednotlivé vrstvy separátoru mají odlišnou teplotu tání. Pokud se článek poškodí a zahřeje na teplotu kolem 100 $^{\circ}\text{C}$ vrstva s nižší teplotou tání se rozteče a zaplní póry další vrstvy [13]. V poškozeném článku je katoda izolována od anody a tím je zabráněno šíření poruchy (vysoké teploty/vysokého napětí) do dalších článků bateriového modulu [14]. Pokud však na baterii působí vnější teplotní zatížení vyšší než je horní limit funkčnosti separátorů nebo se vlivem vnitřní poruchy článek zahřeje rychleji než je separátor schopen zareagovat, dochází k nekontrolovatelnému šíření poruchy z jednoho článku baterie na články ostatní [7].

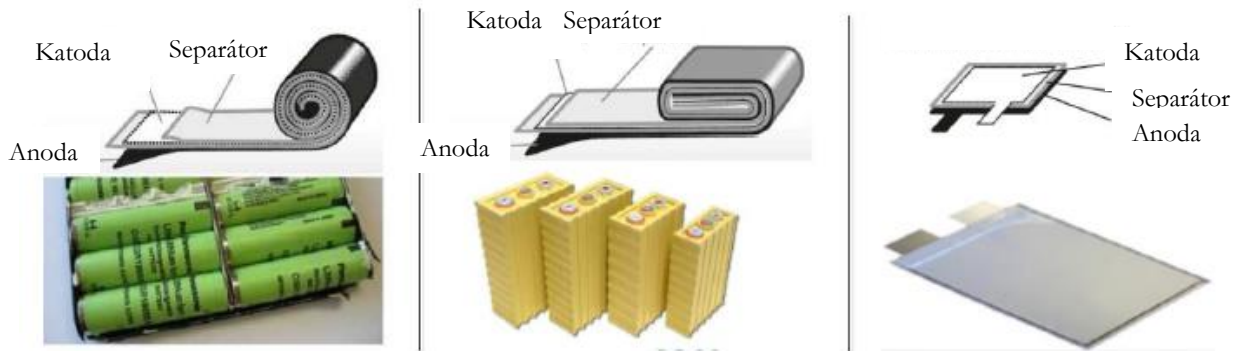
Separátory jsou většinou tvořeny mikroporézními polyethylenovými nebo polypropylenovými membránami, netkanými textiliemi, nebo anorganickými kompozitními membránami [5][10].

Vynikají vysokou mechanickou pevností, chemickou stabilitou, teplotní stabilitou a samohasícími vlastnostmi. Separátory však mohou být samy příčinou zkratu. Při provozu jsou totiž opakovaně namáhány tahem. V důsledku namáhání může dojít k poškození a uvolnění jejich části nebo k jejich přetržení. Uvolněná část separátoru pak může způsobit zkrat. Samo-uzavíratelné separátory mají navíc tu nevýhodu, že pokud se uzavřou, neexistuje již žádný způsob, jak článek bezpečně vybit [4].

Zásadní vliv na bezpečnost baterie má to, jaký typ článku je v baterii použit. Běžně používané typy článků v EV bateriích jsou: sáčkové články, prizmatické články a válcové články (obrázek 5). Prizmatické a válcové články vykazují větší mechanickou odolnost než

sáčkové články [10]. Prizmatické a sáčkové články vynikají vysokou hustotou a dochází v nich snadněji k disipaci přebytečného tepla. Prizmatické články mají tedy nejlepší kombinaci fyzikálních vlastností, jsou však ze všech typů článků nejdražší.

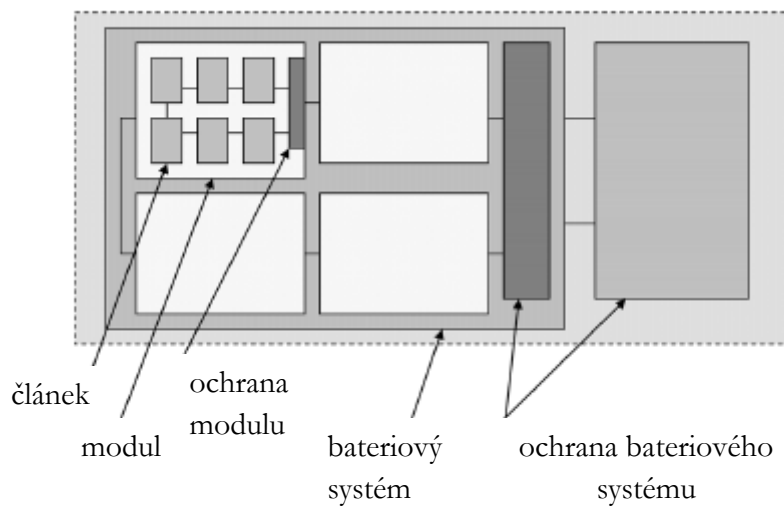
Kryt článku se odvíjí od použitého typu článku a zásadně ovlivňuje jeho ochranu před nárazem či vniknutím cizího tělesa. [13].



Obrázek 5 Schematické znázornění jednotlivých typů článků dle vnitřního uspořádání. Válcové články (vlevo), prizmatické články (uprostřed), sáčkové články (vpravo) [15].

6.4 Battery management system (BMS)

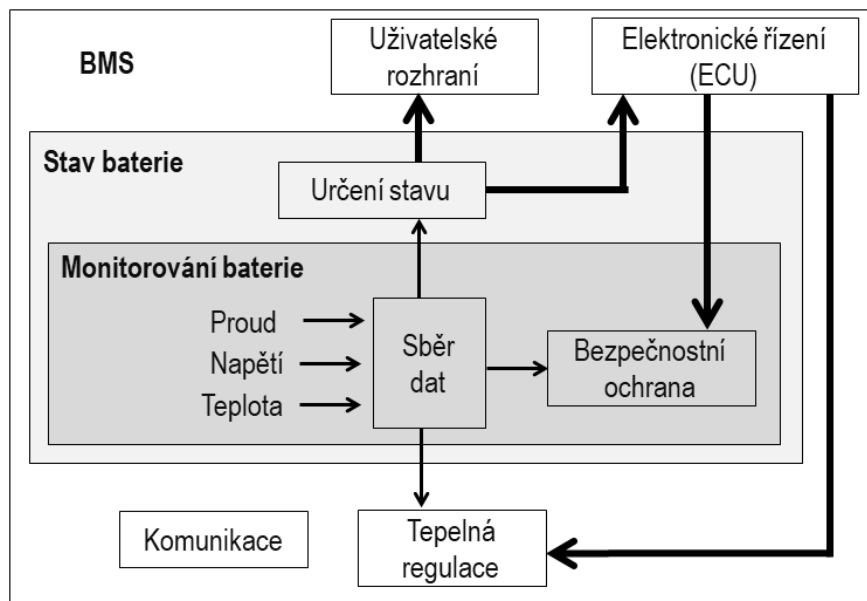
BMS je samostatná jednotka s hardwarem a softwarem, který je napojen na baterii (obrázek 6). Jeho součástí je několik snímačů, které monitorují jednotlivé parametry, které jsou klíčové pro určení stavu nabití (SOC) a bezpečný chod baterie [16][4].



Obrázek 6 Schematické zobrazení článků, modulů a kontrolní elektroniky v bateriovém systému [5].

6.4.1 Funkce BMS

Úlohou BMS je chránit jednotlivé články baterie před překročením maximálního napětí a před poklesem napětí pod dovolenou hodnotu. Dále BMS chrání jednotlivé články před překročením maximální povolené teploty. Pokud této teploty některý článek dosáhne, je úkolem BMS zastavit proud, nebo odeslat požadavek na zastavení proudu, případně zahájit chlazení. Tak je baterie chráněna proti thermal runaway. BMS by měl informovat uživatele o stavu nabití baterie a snažit se o dosažení maximální kapacity baterie [17]. Struktura BMS je schematicky zobrazena na obrázku 7.



Obrázek 7 Ilustrace struktury a fungování BMS [18].

6.4.2 Blokové uspořádání BMS

Celý BMS se skládá z několika funkčních bloků (obrázek 8), ve kterých jsou vyhodnocovány hodnoty veličin měřitelných pomocí snímačů, a z funkčních bloků, ve kterých jsou dopočítávány hodnoty nepřímo měřitelných veličin.

Měřicí blok

Měří napětí na jednotlivých člancích a dále proud a teplotu v různých bodech baterie. Dále měří teplotu v okolí článků a převádí naměřené hodnoty do digitálního formátu. Tím, že měření napětí probíhá na jednotlivých člancích, se sice zvyšují náklady na hardware BMS, ale zároveň je tak baterie chráněna proti přebití již na úrovni článků, což je klíčové [16].

Algoritmický blok

Funkcí tohoto bloku je odhad nabití baterie (SOC) a životnosti baterie (SOH), pomocí hodnot z měřicího bloku – napětí, proudu a teploty. Existuje více metod, jak SOC z těchto parametrů určit [16].

SOC je definován jako kapacita baterie, která je vyjádřena v procentech ze jmenovité kapacity baterie. Vypovídá o energii, která je uchována v baterii. SOC je ovlivněn teplotou, stářím baterie a počtem nabíjecích/vybíjecích cyklů. Tyto vlivy by měly být brány v potaz při odhadu SOC [16].

Znalost SOC je důležitá nejen kvůli odhadu vzdálenosti, kterou je EV vozidlo schopné ještě ujet, ale také kvůli ochraně proti nadměrnému nabití nebo nadměrnému vybití baterie. K nadměrnému nabití baterie nemusí dojít přímo při nabíjení baterie, ale i krátce po té, například vlivem regenerativního brždění při jízdě EV vozidla. Úkolem BMS je baterii před takovými stavy ochránit [16].

SOH určuje, kolik procent z celkového života baterie zbývá. Pro SOH však neexistuje žádná jednotná definice, protože není určen z žádného měření konkrétních fyzikálních veličin. Většinou bývá SOH určováno z rozdílu kapacity baterie v průběhu života baterie a původní maximální kapacity baterie po její výrobě. Pro přesné určení SOH by mělo být však zahrnuto více faktorů [18].

Blok odhadu kapacity

Na základě znalosti SOC, napětí a teploty v článkách určuje tento blok maximální proud, bezpečný pro nabíjení a vybíjení baterie v konkrétních podmínkách. Výsledek tohoto bloku je předáván do elektronické kontrolní jednotky (ECU), která hlídá, aby do baterie nebyl přiváděn příliš velký proud. Pokud se teplota pohybuje například mezi 30 °C – 40 °C musí být nabíjecí proud snížen. Pokud naopak teplota klesne pod hodnotu -20 °C, neměla by být baterie vystavena vybíjení [16].

Kompenzační blok

Vlivem nepřesnosti výroby se jednotlivé články mohou lišit. Rozdílnost v kapacitě jednotlivých článků se může pohybovat v rozmezí mezi 1 % až 15 %. Běžná je i rozdílnost vnitřního odporu jednotlivých článků a rozdílnost nabíjecí/vybíjecí charakteristiky článků. Pro maximální využití kapacity a životnosti baterie je nezbytné neustálé vyrovnávání stavu jednotlivých článků [16]. V bateriovém modulu totiž prochází všemi sériově zapojenými články stejný proud, na jednotlivých článkách však nemusí být stejné napětí [18].

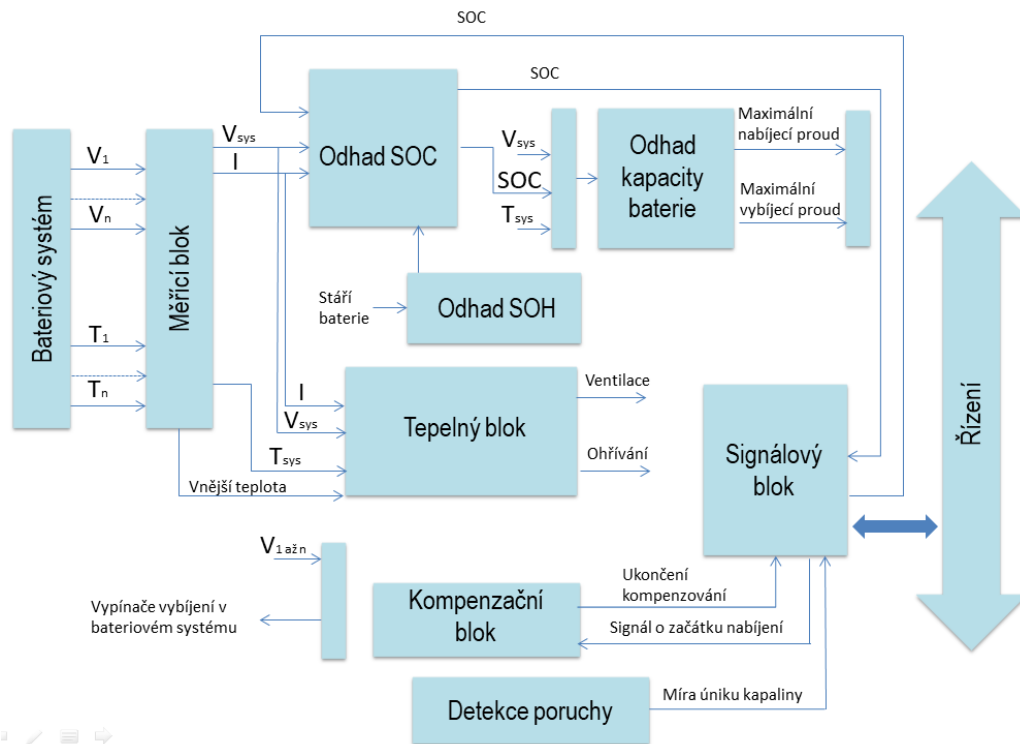
Kompenzační blok srovnává napětí jednotlivých článků a vyhodnocuje rozdíl mezi nejvyšším napětím a nejnižším napětím na člancích baterie. Pokud je rozdíl vyšší, než je limitní hodnota pro danou baterii, je zastaveno nabíjení a článek s nejvyšším napětím je vybit pomocí vybíjecího rezistoru. Vybíjení článků s vysokým napětím pokračuje, dokud rozdíl nejvíce a nejméně nabitého článku neklesne pod limitní hodnotu. Tento proces je označován jako disipativní vyrovnávání napětí v člancích [16].

Vedle disipativního vyrovnávání napětí v člancích existuje i aktivní vyrovnávání napětí v člancích. Během aktivního vyrovnávání napětí v člancích je buď nabíjen každý článek baterie samostatně, nebo je nabíjení článku s nevyšším napětím přesměrováno k článkům, které jsou nabitě nejméně [16]. Tento způsob vyrovnávání napětí má vyšší účinnost než disipativní způsob [18].

Tepelný blok

Tepelný blok v BMS odhaduje teplotu baterie a chrání baterii před poškozením příliš vysokou, nebo naopak nízkou teplotou. Výstupy z tohoto bloku ovládají ventilaci a ohřívač, které zajišťují, aby byla teplota baterie v bezpečném pásmu. V případě abnormálního růstu teploty baterie vysílá tepelný blok signál do ECU [16].

Mimo měření výše zmíněných veličin byly projeveny snahy o měření impedance v bateriích, její znalost by umožnila přesnější a snadnější odhad SOC. Měření impedance je však velmi nákladné a navíc prostorově náročné, takže se v současné době v bateriích zatím nepoužívá [6].



Obrázek 8 Blokový diagram BMS [6].

6.5 Chlazení a přetlakové ventily

Většina baterií je chlazená vzduchem nebo kapalinou. Některé baterie mohou fungovat i bez chlazení. V chladných oblastech je termoregulační systém baterie uzpůsoben tak, aby ji mohl v případě nutnosti nejen chladit ale i zahřívát. Výběr typu chlazení je závislý na použití baterie a na podnebí, ve kterém bude provozována [10].

U článku je dále klíčové použití přetlakových ventilů. Tyto ventily chrání články před roztržením nebo explozí. Dojde-li totiž k vnitřnímu poškození článku, zvýšení jeho teploty a v důsledku toho k zvýšené produkci plynů uvnitř článku, může tlak uvnitř článku prudce vzrůstat [10]. Tlakové ventily jsou většinou aktivovány, pokud vnitřní tlak v článku překročí 10 barů (1 MPa). Sáčkové články tyto ventily nemají [5].

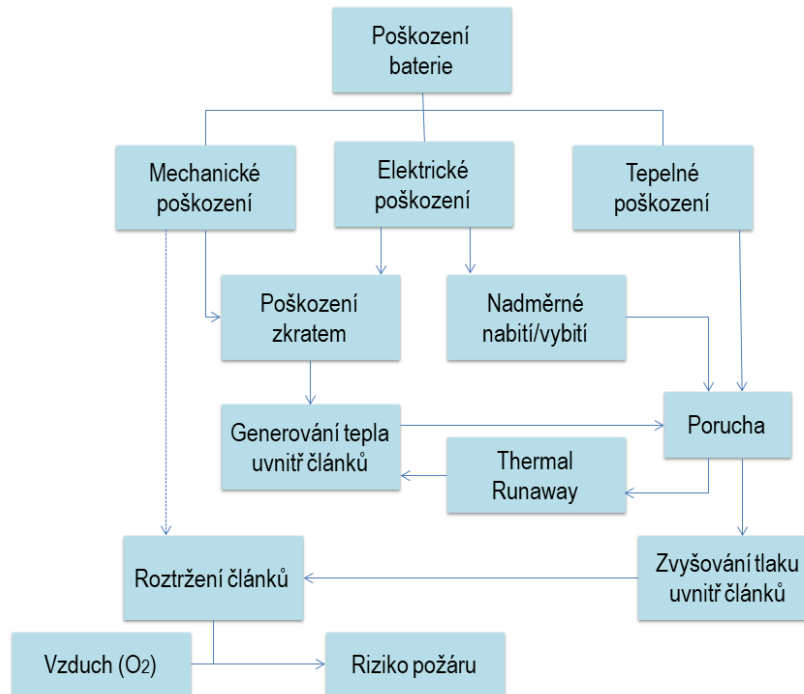
6.6 Charakteristika selhání baterií

Příčinou selhání baterií může být jejich vnější poškození nebo spontánní chyba uvnitř baterie, která je způsobena předchozí chybou ve výrobě. K selhání vlivem vnějšího poškození dochází častěji [5].

Současně používané testy ve výrobě (kontrola rentgenovým zářením, vysoko - potenciální testování atd.) jsou na velmi vysoké úrovni, ani tyto testy však nedokáží chybu vedoucí k vnitřnímu samovznícení baterie vždy stoprocentně odhalit. K selhání článku vlivem

chyby ve výrobě dochází přibližně u 1 ze 40 milionů článků. Baterie jsou proto navrhovány tak, aby při samovznícení, byla poškozena co nejmenší část bateriového modulu [5].

Příčiny a důsledky selhání baterií vlivem vnějšího poškození jsou zobrazeny v níže uvedeném schématu (obrázek 9).



Obrázek 9 Schéma příčin a důsledků selhání baterií [7].

6.7 Testování baterií

Vzhledem k vysokému nebezpečí, které hrozí při narušení správného chodu baterií, jsou baterie důkladně testovány. Během testů jsou vystaveny abnormálním podmínkám a prostředí [5]. Testování baterií lze rozdělit do čtyř hlavních skupin:

- 1) Testování proti tepelnému poškození (testování tepelné stability, simulace šíření požáru mezi články, testování odolnosti vůči skladování při zvýšené teplotě, testování odolnosti proti rychlému nabití/vybití, testování odolnosti proti tepelnému šoku) [3]
- 2) Testování proti elektrickému poškození (testování odolnosti proti nadměrnému vybití/nabití, testování odolnosti proti vzniku zkratu a přepětí) [3]
- 3) Testování proti mechanickému poškození (testování odolnosti proti rozdrčení, pronikání cizích těles, pádu, nárazům, zrychlení a vibracím) [3]
- 4) Chemické testování (kontrola emisí, testování hořlavosti) [3]

Po provedení výše uvedených testů je dle většiny norem požadováno, aby z baterie neunikal elektrolyt, nebyly na ní známky porušení, nevznítla se nebo neexplodovala [1].

Hlavním cílem tohoto testování je navrhnout bateriový modul, který se skládá z velkého množství bateriových článků tak, aby se porucha z jednoho článku nešířila do článků dalších [5].

6.8 Testování baterií na mechanický náraz

Cílem tohoto testu je vyhodnotit odolnost baterie vůči náhlému zrychlení nebo zpomalení vozidla. Během testu je testované zařízení (DUT) vystaveno definovanému zrychlení po definovanou dobu. Hodnoty zrychlení jsou definovány tak, aby odpovídaly nejen hodnotám zrychlení při běžném pohybu vozidla, ale i hodnotám zrychlení při havárii vozidla. Požadovaný průběh testů může být v různých normách odlišný. Může se lišit směr, ve kterém je provedení testu požadováno, velikost zrychlení při testu nebo doba, po kterou je baterie při testu zrychlení vystavena.

Nejčastější porucha, ke které dochází při testování na mechanický náraz, je zkrat [5].

6.9 Mechanický náraz dle UN/ECE-R100.02:2013 (EHK 100)

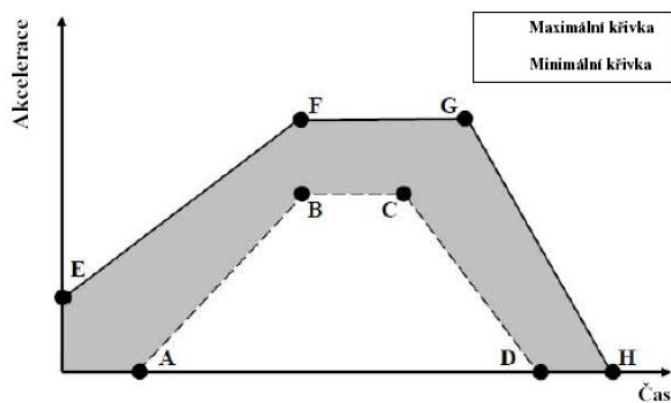
Zkouška na mechanický náraz má ověřit bezpečnost provozu bateriových článků/modulů při zatížení zrychlením, které na baterii může působit při nehodě vozidla [2].

Zkouška se provádí buď na úplném nabíjecím zásobníku energie (RESS) nebo na subsystémech RESS. Pokud se zkouška provádí pouze na subsystémech RESS musí výrobce prokázat, že zkouška na subsystému reprezentuje vlastnosti celého RESS. Systém se většinou testuje i s řídicí jednotkou BMS. Pokud není BMS integrována do krytu uzavírajícího bateriové články, je možné na žádost výrobce provádět testy bez něj. Zkoušené zařízení musí být během zkoušky uchyceno tak, jak bude později uchyceno ve vozidle [2].

Zkouška by měla probíhat při okolní teplotě 20 ± 10 °C. Zkoušené zařízení by mělo být při zkoušce nabito na hodnotu nad 50 % normálního pracovního rozsahu nabití [2].

Během zkoušky musí být funkční všechna ochranná zařízení, která by mohla ovlivnit funkci zkoušeného zařízení [2].

Zkoušené zařízení se podrobí deceleraci nebo akceleraci. Hodnoty mezi decelerace/akcelerace, které jsou požadované při zkoušce, jsou uvedeny níže na obrázku 10 a v tabulce 2 [2].



Obrázek 10 Zobrazení pásma průběhu akcelerace/ decelerace při testování dle normy EHK 100 [2].

Bod	Čas [ms]	Vozidla kategorie M ₁ a N ₁ ² akcelerace [g]		Vozidla kategorie M ₂ a N ₂ ³ akcelerace [g]		Vozidla kategorie M ₃ a N ₃ ⁴ 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

Tabulka 2 Meze akcelerace/ decelerace při testování dle normy EHK 100 [2].

Po provedení testu je nutné zkoušené zařízení ještě po dobu jedné hodiny sledovat, pokud se neprojeví žádné známky porušení zařízení, je zkouška ukončena [2].

² M1 – vozidla pro přepravu maximálně 8 osob (mimo řidiče)

N1 – vozidla s hmotností pod 3500 kg

³ M2 – vozidla pro přepravu více než 8 osob, s hmotností nepřesahující 5000 kg

N2 – vozidla, jejichž hmotnost se pohybuje mezi 3500 až 12 000 kg

⁴ M3 – vozidla pro přepravu více než 8 osob, s hmotností nad 5000 kg

N3 – vozidla s hmotností nad 1200 kg [33]

6.10 Mechanický náraz dle ostatních norem

IEC 62 281: 2016

Každý článek baterie by měl být vystaven polo sinusovému pulzu zrychlení o velikosti 150 g, s délkou trvání pulzu 6 milisekund. Velké články baterií/bateriové moduly by měly být vystaveny polo sinusovému pulzu 50 g, s délkou trvání pulzu 11 milisekund. Každý článek baterie/bateriový modul by měl být testován třikrát po sobě v pozitivním směru a třikrát po sobě v negativním směru, ve třech na sebe kolmých polohách. Každý článek baterie/bateriový modul by měl tedy být během testování vystaven celkem 18-ti pulzům [19].

IEC 62 660-2: 2010

Norma definuje pouze testování bateriových článků. Články by měly být vystaveny polo sinusovému pulzu s maximálním zrychlením 50 g, s délkou trvání pulzu 6 milisekund. Test by měl být proveden desetkrát ve směru, ve kterém bude ve vozidle zatěžován bateriový článek [19].

ISO 12 405-3: 2014

Norma definuje pouze testování celých bateriových systémů. Bateriové systémy by měly být vystaveny polo sinusovým pulzům 50 g s délkou trvání 6 milisekund. Test by měl být proveden desetkrát ve stejném směru, jako bude zrychlením namáhán bateriový systém ve vozidle [4]. Požadovaný SOC je 50 % [3]. Po testu by neměl být detekován únik kapaliny z baterie, prasknutí, požár nebo výbuch. Izolační odpor by neměl být větší než 100 W/V pro DC – systémy a 500 W/V pro AC – systémy [19].

SAE J2464: 2009

Je definována pro články, moduly i bateriové systémy. Pro testování bateriových systémů je předepsán polo sinusový pulz o vrcholném zrychlení 25 g trvajícím 15 ms. Zkouší se třikrát v pozitivním i negativním směru ve třech na sebe kolmých polohách. Celkem tedy zkouška probíhá osmnáctkrát. SOC by se měl během zkoušky pohybovat mezi 95 až 100 % [3][4]. DUT by měl být sledován alespoň 1 hodinu po zkoušce [19]. Zaznamenává se teplota, napětí, odpor, hmotnost a rozměry modulu před a po testu [4].

SAE J2929: 2011

Definováno pro články, moduly i bateriové systémy. Testování probíhá v kladném i záporném směru při umístění baterie jako ve vozidle a při umístění baterie kolmo na směr, ve kterém bude uchycena ve vozidle. Test je tedy nutno provést celkem čtyřikrát. Maximální zrychlení při testování bateriových systémů by mělo být 25 g a jeho trvání 15 ms. SOC během testování by měl být 95 až 100 % [3]. DUT se sleduje jednu hodinu

po testu. Nesmí u něj být nalezeno žádné poškození nebo známky hoření. Izolace při testování vzhledem k zemi by měla být minimálně 100 Ω/V [4].

UL 2580: 2013

Norma definuje testování článku, modulu i celého bateriového systému. Při testování modulů a bateriových systémů je požadováno plné nabití. DUT je vystaven polo sinusovému pulzu o velikosti 25 g po dobu 15 s. DUT by měl být monitorován 1 hodinu po testu [3][4].

UN 38.3 2015

Každý článek baterie by měl být vystavený polo sinusovému pulzu s vrcholným zrychlením 150 g, délka trvání pulzu by měla být 6 milisekund. Pokud se testují velké články nebo bateriové moduly, měly by být vystaveny polo sinusovému pulzu s vrcholným zrychlením 50 g a délkou trvání pulzu 11 milisekund. Každý článek baterie/bateriový modul by měl být testován třikrát po sobě v pozitivním směru a třikrát po sobě v negativním směru. Každý článek baterie/bateriový modul by měl být testován ve třech na sebe kolmých směrech. Každý článek baterie/bateriový modul by měl tedy být během testování vystaven celkem 18-ti pulzům. Napětí na svorkách každého zkoušeného článku/baterie po zkoušce nesmí přesáhnout 90 % napětí naměřeného před zkouškou [19]. Po zkoušce nesmí být zaznamenán úbytek hmotnosti vzhledem k hmotnosti před zkouškou, prasknutí nebo požár [4].

6.11 Bezpečnostní opatření

6.11.1 Bezpečnostní opatření před testováním baterií

Bateriový systém by se měl skladovat v suchém, čistém a dobře větraném prostředí. Teplota skladování by se měla pohybovat mezi -10 °C a 30 °C. Baterie by neměla být vystavována velkým teplotním změnám. Měla by být skladována při SOC 50 %, není-li výrobcem stanoveno jinak. Pokud je baterie skladována delší dobu, měla by být před testem opakovaně nabita a vybita, aby byla obnovena její plná funkčnost. Pro nabíjení je doporučena teplota kolem 20 °C.

6.11.2 Bezpečnostní opatření během testování baterií a po ukončení testování baterií

Před testem na mechanický náraz je potřeba baterii upevnit do zkušebního zařízení tak, jak bude později uchycena ve vozidle a osadit ji potřebnými čidly. Dále je nutné baterii nabít na normou požadované hodnoty SOC, pak může následovat samotný test. Během testu je monitorováno napětí, proud a teplota baterie. Může být prováděna detekce plynů [7]. Dále je měřena akcelerace.

Po provedení testu by měl být zkontrolován izolační odpor baterie a případný únik chladicí kapaliny nebo kouře.

Osoby manipulující s RESS by měly používat ochranné pomůcky určené pro práci s vysokým napětím. Měly by mít nehořlavý oděv, ochranné brýle, izolační rukavice a ochrannou obuv. Ruční nástroje, které jsou používány při manipulaci s RESS, by měly být také izolovány [1]. Stejnoseměrné napětí na bateriích může totiž dosahovat 200 až 800 V (stejnoseměrné napětí o 120 V už je život ohrožující) [7].

Po skončení testu by baterie měly být skladovány odděleně od baterií, které ještě nebyly testovány. Sklad by měl být dobře větratelný a dobře dostupný při případném hašení požáru. Sklad by měl být neustále monitorován.

Pokud je baterie po testu forenzně přezkoumána a nejsou na ní nalezeny žádné defekty, je možné ji považovat za bezpečnou.

Schematické znázornění procesu testování baterie na mechanický náraz je na obrázku 11.



Obrázek 11 Schematické zobrazení procesu testování baterie.

6.12 Požár Lithium - iontových baterií

6.12.1 Růst teploty baterie a následné vznícení

Pokud je baterie vystavena teplotě kolem 70 °C, začne se elektrolyt, který má nízký bod varu, v článcích vypařovat. To vede ke zvýšení tlaku v článcích, v krajním případě dokonce k jejich prasknutí. Pokud teplota baterie dosáhne přibližně 130 °C, separátory se začnou tavit a přestávají plnit svoji funkci. Nastává přímý kontakt mezi anodou a katodou, v důsledku toho může nastat zkrat, který vede k dalšímu ohřívání baterie. Pokud se teplota zvýší na 150 °C až 250 °C začne se rozpadat katoda, která reaguje s elektrolytem, uvolňuje se teplo a kyslík. Tlak v článcích se zvyšuje. Když článek dosáhne teploty 660 °C, začnou se

tavit hliníkové součásti baterie a její teplota se neřízeně zvyšuje. Baterie hoří. Teplota jednotlivých článků může dosáhnout 700 °C až 1000 °C [13].

6.12.2 Požár elektrických vozidel versus požár konvenčních vozidel

Z testů provedených v INERIS požární galerii ve Francii, kde byly sledovány požáry dvou EV vozidel a dvou vozidel se spalovacím motorem (ICE), plynou následující závěry [20].

Obecné chování EV a ICE vozidel vystavených stejnému vnějšímu teplotnímu zatížení je velmi podobné. Maximální rychlost uvolňování tepla a spalné teplo byly u obou typů vozidel srovnatelné. Uvolněné množství CO₂, CO, celkové množství uhlovodíků, NO, NO₂, HCl a HCN bylo u obou typů vozidel taktéž velmi podobné. Uvolněné množství HF bylo však výrazně vyšší u EV vozidel [20]. Zdrojem toxických plynů jako je HF při hoření Li – iontových baterií jsou velmi často plastové kryty chránící baterie, ne články samotné [21].

Během hoření jsou všechny uvolňované plyny horké a jsou tedy unášeny vzhůru. Po vychladnutí mají však některé z uvolněných plynů vyšší hustotu než vzduch a klesají k zemi. Z toxických plynů je to například HCl.

Ačkoliv jsou mediálně požáry EV vozidel hojně rozebírány, nejsou příliš odlišné od požárů ICE vozidel či hoření plastů. Průměrná míra emisí při hoření Li – iontových baterií pro EV vozidla vztažená na kilogram je dokonce nižší, než průměrná míra emisí vztažených na kilogram hořících plastů. Emise u Li – iontových baterií jsou však uvolňovány nárazově ve větších koncentracích tak, jak jsou postupně poškozovány jednotlivé články [21].

Zdravotní rizika, materiálová inkompatibilita, a hořlavost komponent Li – iontových baterií a vedlejších komponent vznikajících při thermal runaway Li – iontových baterií je shrnuta v tabulce 3 a tabulce 4.

Insurance institut for hightway safety (IIHS) provedl studii o dopravních nehodách spojených s požárem, které se staly mezi rokem 2009 a 2014. Množství těchto nehod elektrických a hybridních vozidel bylo srovnatelné s množstvím nehod vozidel se spalovacím motorem [1].

Komponent	Příklad	Zdravotní riziko	Inkompatibilita	Hořlavost
Katoda	Lithium kobalt oxid (LiCoO_2); Lithium mangan oxid (LiMn_2O_4) Lithium železo fosfát (LiFePO_4)	Dráždivý pro oči, pokožku, respirační a gastrointestinální trakt, potenciální karcinogen	Žádná, nevystavovat extrémnímu teplu a ohni	Nehořlavá
Anoda	Grafit (C)	V pevném skupenství žádné (doporučeno vyhnout se prachu)	Žádná, nevystavovat extrémnímu teplu a ohni	Nehořlavá
Elektrolytická sůl	Lithium Hexafluorofosfát (LiPF_6)	Způsobuje popáleniny očí, pokožky, gastrointestinálního traktu a respiračního traktu	Voda, oxidační činidla, silné kyseliny	Nehořlavá
Elektrolytické rozpouštědlo	EC; DMC; PC; DEC	Dráždivý pro oči, pokožku, respirační a gastrointestinální trakt	Oxidační činidla, kyseliny, alkálie	Hořlavé
Separátor/Vazač	Polyetylen; Polypropylen	Žádné	Žádná, nevystavovat extrémnímu teplu a ohni	Nehořlavý

Tabulka 3 Přehled zdravotních rizik, materiálové inkompatibility a hořlavosti komponent Li – iontových baterií [4].

Komponent	Zdravotní riziko	Inkompatibilita	Hořlavost
LiF	Dráždivý pro oči a pokožku, při požití nebo vdechnutí toxický	Voda, kyseliny, oxidační činidla	Nehořlavý
HF	Mimořádně nebezpečné (dráždivé, žíravé) pro pokožku, oči a vnitřní orgány při požití/vdechnutí	Kovy, organické materiály, alkálie, sklo, keramika, korozivní pro většinu látek	Nehořlavý, ale může produkovat hořlavé plyny
POF₃	Nejsou k dispozici, pravděpodobně vysoce nebezpečný	Nejsou k dispozici, pravděpodobně inkompatibilní s vodou, kovy a silnými zásadami	Nehořlavý

Tabulka 4 Přehled zdravotních rizik, materiálové inkompatibility a hořlavosti vedlejších komponent vznikajících při thermal runaway Li – iontových baterií [4].

6.13 Hašení Lithium – iontových baterií

Ideální hasicí přípravek pro hašení Li – iontových baterií by měl být vysoce tepelně vodivý, ale zároveň by měl být i elektrickým izolantem. Takový hasicí přípravek však neexistuje, proto se při hledání vhodného hasicího přípravku pro Li – iontové baterie snažíme nalézt alespoň kompromis obou vlastností [21].

Deionizovaná voda splňuje sice obě kritéria ideálního hasicího přípravku, ale pouze než se do ní uvolní popel a saze z hořící baterie, pak se stává vodivou. Voda je vysoce tepelně vodivá, není však elektrickým izolantem. Plyny nebo aerosoly jsou sice elektrickými izolanty, ale mají nižší tepelnou vodivost než voda a zároveň se obtížněji dostávají přímo ke zdroji tepla. Hašení pěnou je založeno především na izolaci hořícího objektu od okolí, ale ne na jeho ochlazení [21].

Instituce DNV GL tedy k hašení doporučuje vodu kvůli jejímu vysokému chladicímu účinku, při hašení je však nutno počítat s možností vzniku zkratu [21].

Při hašení lithiových baterií ponořením do vody, je třeba mít na paměti, že i po 24 hodinách od ponoření nemusí být všechny články plně vyzkratované a může na nich stále být napětí [21]. Použitím slané vody může být efekt pronikání vody do článků a následné vyzkratování článků urychlen.

Množství vody potřebné pro hašení baterie rapidně roste, pokud nemá baterie žádnou ochranu proti šíření ohně z jednoho článku na další. Odhady potřebné ventilace a spotřeby vody během hašení jsou uvedeny níže v tabulce 5. Na uhašení požáru baterie elektromobilu by mělo stačit přibližně 500 až 1000 l vody [21].

Velikost systému [kWh]	Odhadovaná hmotnost [kg]	Odhadovaná velikost místnosti [ft ²]	Požadovaná ventilace [CFM]	Teoreticky minimální požadavek [GPM]
20	133,3	100	2,3	2
100	666,7	146	11,7	9,8
1000	6 666,7	300	116,8	98,1

Tabulka 5 Požadavky na ventilaci a množství vody potřebné k hašení Li – iontových baterií [21].

Při hašení baterií vodou nebyl při testování pozorován žádný přestup elektrického proudu přes proud hasící vody. Běžně používaný hasičský oblek se při testování ukázal jako dostatečná ochrana proti poranění elektrickým proudem [21]. Při hašení požáru Li – iontových baterií je hasičům doporučeno použití plynové masky.

Pokud mají bateriové články zabudované bezpečnostní ventily, nehrozí při požáru riziko jejich výbuchu. V uvolněných plynech však může docházet ke vzniku elektrických oblouků. Doporučené odvětrávání při hoření baterií je 0,02 – 0,03 CFM/kg. Toto odvětrávání je dostatečné pro udržení bezpečné hladiny HCl ve vzduchu a zároveň redukuje množství výbušných plynů na bezpečnou hladinu [21].

Voda po hašení Li – iontových baterií může obsahovat kousky kovů, pH vody použité pro hašení se pohybuje mezi 6 až 11. Pro likvidaci zbytků baterií po požáru je doporučeno používat osobní ochranné pomůcky a dýchací masku. Je doporučeno se vyvarovat přímému kontaktu kůže s ohořelými částmi baterie [21].

Vnější teplota baterie se při požáru (obrázek 12) může pohybovat mezi 280 až 1000 °C. Teplota uvnitř článků může dosahovat 570 až 1100 °C [22][23].



Obrázek 12 Zobrazení průběhu požáru Li – iontových baterií při testování proti ohni; 1- zapálení baterie propanovým hořákem, 2 - vzplanutí baterie, 3 - průběh požáru po odstranění hořáku, 4 - průběh požáru po zhabájení hašení [22].

6.14 Bezpečnost Lithium – iontových baterií

V médiích je často popisováno takzvané „znovu – vznícení“ baterie, tento pojem je však užíván nesprávně. Pokud je po uhašení řádně zkontrolováno, že elektrické, tepelné i mechanické faktory dosahují bezpečných hodnot, pak hoření baterie nemůže pokračovat. Zkontrolovat hodnoty těchto faktorů však není jednoduché, teplota uvnitř článků totiž může být až o 300 °C vyšší než je naměřená teplota na povrchu článků. Pokud některý z faktorů nedosahuje bezpečných hodnot, může hoření po určité době pokračovat [21].

Při mediálně známé nehodě z roku 2011, kdy došlo k vznícení Chevroletu Volt tři týdny po provedení bočního nárazového testu tohoto vozu, nešlo o „znovu – vznícení“ ani „samo – vznícení“ baterie tak, jak to bylo často popisováno. Příčinou vznícení byla chladicí kapalina, která po nehodě začala pomalu unikat a teprve po třech týdnech způsobila zkrat a následné hoření baterie [24].

7. PRAKTICKÁ ČÁST

7.1 Zadání a analýza problému

Firma TÜV SÜD Czech s.r.o. má v laboratoři DYCOT vybavení potřebné k provádění saňových zkoušek. Zadáním je využít tuto laboratoř a její vybavení k uskutečnění zkoušek baterií pro EV na mechanický náraz (dle EHK 100). Vzhledem k tomu, že technické a bezpečnostní zázemí laboratoře neumožňuje likvidaci případného požáru baterie přímo v laboratoři, jsou hlavní požadavky na systém pro testování EV baterií následující:

- 1) Baterie musí být během testování umístěna v uzavřeném boxu. Box musí v případě poškození baterie během testování zabránit úniku škodlivých plynů z baterie do prostředí laboratoře.
- 2) Box musí umožňovat dostatečně pevné uchycení k saním. Saně se mohou pohybovat se zrychlením v rozmezí mezi 12 až 28 g, dle kategorie vozidla, do kterého jsou baterie určeny.
- 3) Musí být umožněno rychlé odejmutí boxu s testovanou baterií ze saní a její odvezení mimo prostředí laboratoře DYCOT po ukončení testu. Box je odvážen pomocí vysokozdvížného vozíku.

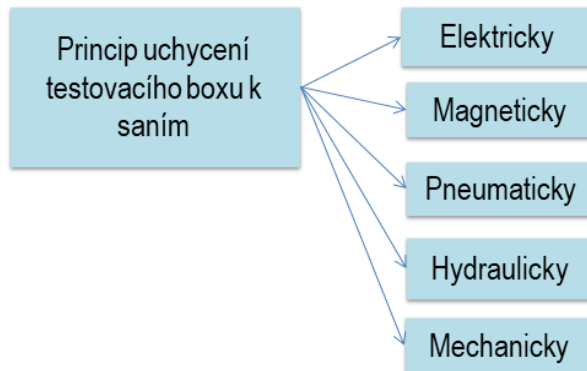
Vzhledem k vysoké míře nebezpečí, které hrozí při poškození baterie, by se k boxu bezprostředně po dokončení testu neměla přibližovat žádná osoba. Uvolnění boxu od saní by proto mělo být možné provést pomocí vysokozdvížného vozíku, případně automaticky.

Testovací box by měl být dimenzován pro testování EV baterií do elektromobilů i elektrobusů. Maximální hmotnost testovaných baterií je stanovena na 1200 kg.

Box by mělo být možné uchytit na saně ve dvou na sebe kolmých polohách. Tak, aby bylo možné testovat baterii dle normy EHK 100 – v podélném i příčném směru.

7.2 Návrhy řešení

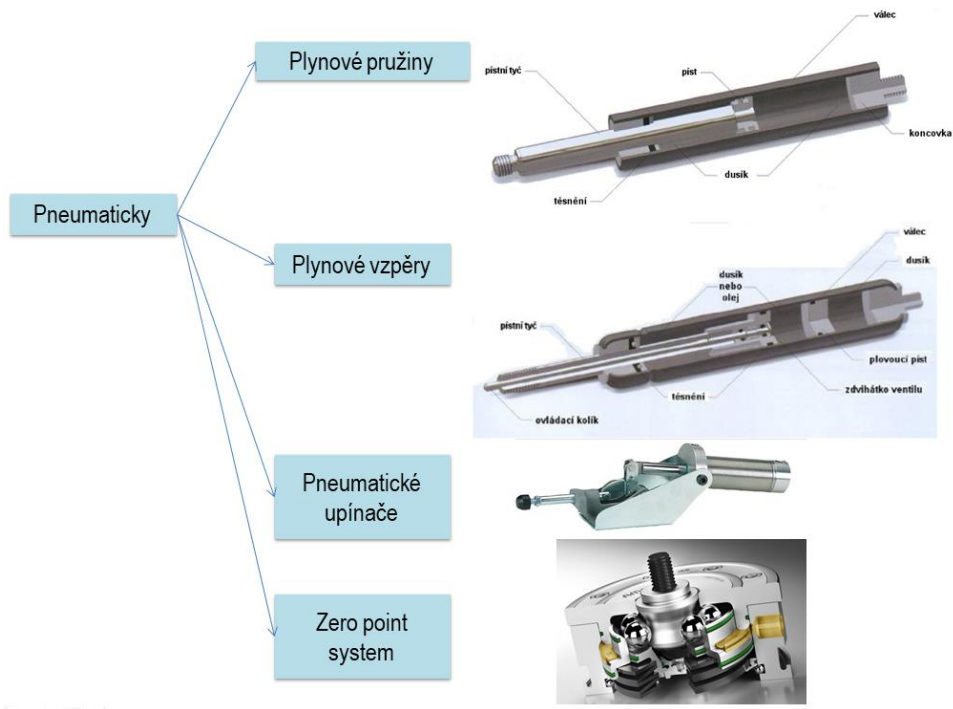
Konkrétnímu návrhu řešení výše uvedeného problému předcházela rozvaha nad mechanickými principy, které by bylo možné k řešení využít (obrázek 13).



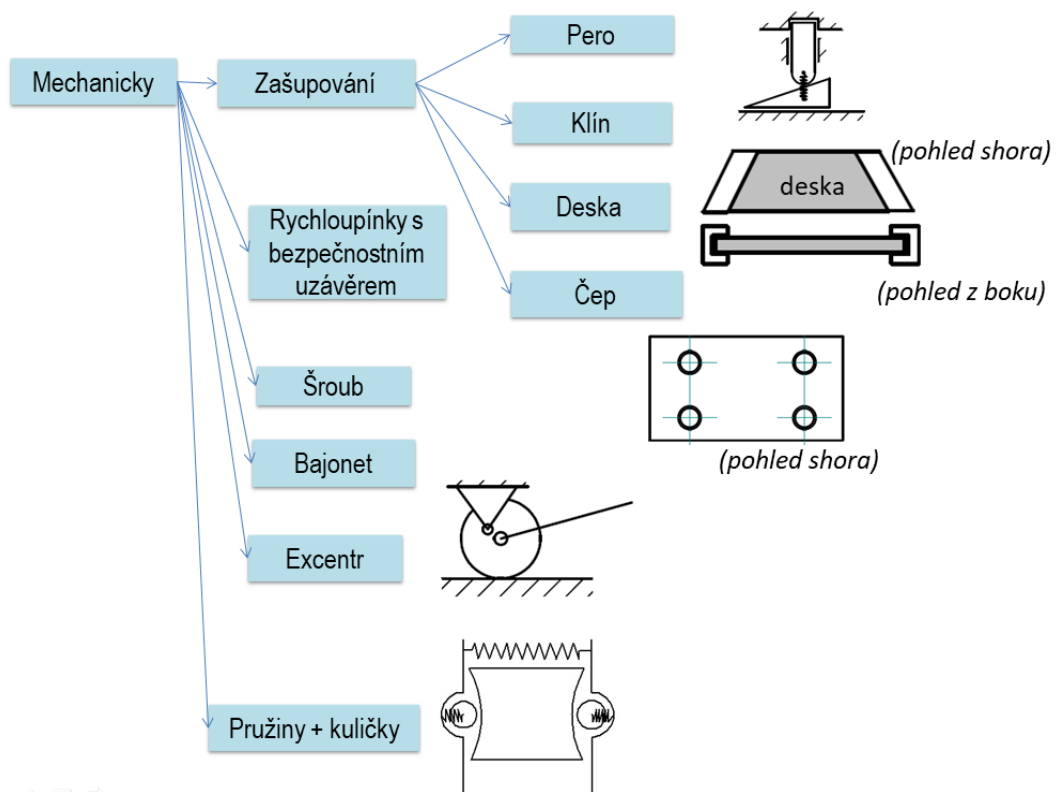
Obrázek 13 Přehled základních principů mechanismů použitelných ke upevnění boxu ke saním.

Využití principu magnetismu případně elektromagnetismu není možné. Mohlo by totiž docházet k rušení měřicí techniky, pomocí které je sledována baterie v průběhu testu. Použití hydrauliky by bylo technicky náročné i nákladné. Zbývá tedy možnost využití pneumatického nebo mechanického principu. Možnosti využití pneumatického a mechanického principu jsou zobrazeny níže na obrázcích 14 a 15.

Pokud by bylo využito automatického uvolnění boxu od saní po testu, nabízejí se dva způsoby provedení. K uvolnění boxu od saní by mohlo dojít v případě, že by byla snímačem rychlosti detekována nulová rychlost pohybu saní po dobu 10 s. Další možností je pak uvolnění boxu ze saní pomocí dálkového ovladače z kabiny vysokozdvižného vozíku.



Obrázek 14 Možnosti využití pneumatických principů [25]–[28].



Obrázek 15 Možnosti využití mechanických principů.

Při hledání řešení je třeba brát v potaz, že funkčnost mechanismu musí být zachována nezávisle na zdroji energie. V případě selhání zdroje energie musí box zůstat pevně přichycen k saním po celou dobu testu. Stejně tak pokud dojde k selhání zdroje energie bezprostředně po testu, musí existovat možnost, jak box ze saní odejmout. Při volbě řešení, které umožňuje dálkové ovládání odepínání boxu od saní, je třeba navrhnout ještě záložní mechanismus, který umožní manuální odepnutí boxu.

S ohledem na maximální možnou bezpečnost při testování baterií bylo nakonec zvoleno čistě mechanické řešení, ve kterém bude baterie po testu odepnuta od saní pomocí vidlí vysokozdvížného vozíku. Pokud by totiž bylo odepnutí ovládáno automaticky, musel by být hlavní upevňovací systém jistěn ještě záložním upevňovacím systémem, který by box na saních udržel v případě chyby v řízení systému.

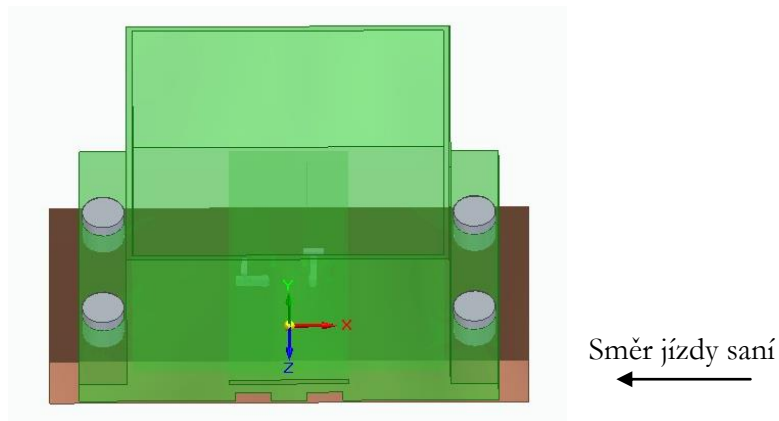
V další fázi je tedy hledáno mechanické řešení, které využívá nějaký z výše uvedených mechanických principů, případně kombinaci uvedených principů.

7.3 Návrhy mechanických řešení

Na základě výše uvedených mechanických principů bylo navrženo několik mechanismů, pomocí kterých je možné uchytit box pro testování baterií k saním. Zavrženy byly poté mechanismy využívající klín. U těchto mechanismů hrozí nebezpečí nemožnosti odepnutí boxu od saní v důsledku samosvornosti klínů. Dále byly zavrženy mechanismy, u kterých hrála klíčovou roli pružina. U pružiny by vlivem opakovaného používání mohlo docházet k postupné změně její charakteristiky, případně by vlivem působení vysokého zrychlení mohla selhat. Její selhání hrozí zvláště v případě, kdy by byla umístěna tak, že by její osa byla rovnoběžná se směrem jízdy saní. Zamítnuta byla i všechna řešení, která vyžadovala postupné posunutí boxu vysokozdvížným vozíkem v kolmém směru na pohyb saní a až poté jeho zvednutí. Tato řešení nejsou vhodná z důvodu nedostatku manipulačního prostoru v laboratoři.

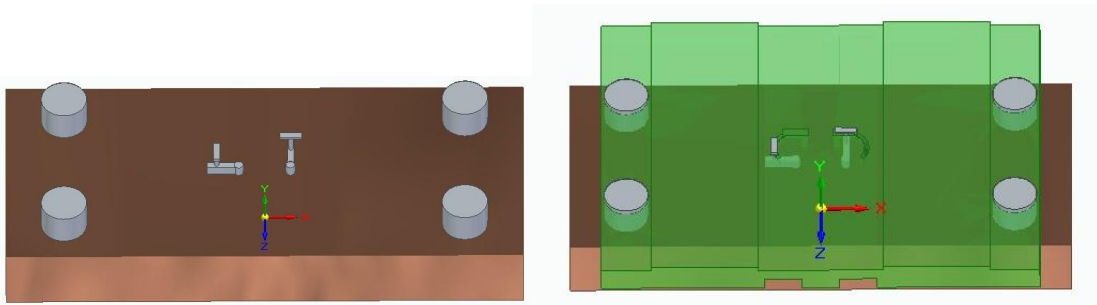
Po zohlednění všech požadavků na funkčnost, bezpečnost a dostupnou cenu konstrukce mechanismu byl vytvořen schématický návrh tří možných řešení upevnění boxu k saním. Návrhy byly modelovány v programu Solid Edge ST9.

V návrhu číslo 1 (obrázek 16) je box uchyten k saním pomocí čtyř čepů a dvou západek. Čepy zachycují box ve směru jízdy (osa x) a ve směru kolmém na směr jízdy (osa z). Západky pak jistí box ve směru kolmém na rovinu saní (osa y). Západky jsou pevně uchyteny k saním a je umožněna pouze jejich rotace. Čepy jsou pevně uchyteny k saním, bez možnosti jakéhokoliv pohybu. Západky se mohou (při rotaci) pohybovat v zakřivené drážce, která se na konci rozšiřuje. Západky jsou ze své původní polohy, kdy znemožňují pohyb boxu ve svislém směru, odtlačeny vidlemi vysokozdvížného vozíku. Po odtlačení západek vidlemi je horní část západek posunuta do místa s rozšířenou drážkou, tvarový zámek přestává fungovat a box je možné ze saní odejmout.



Obrázek 16 Návrh číslo 1; hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.

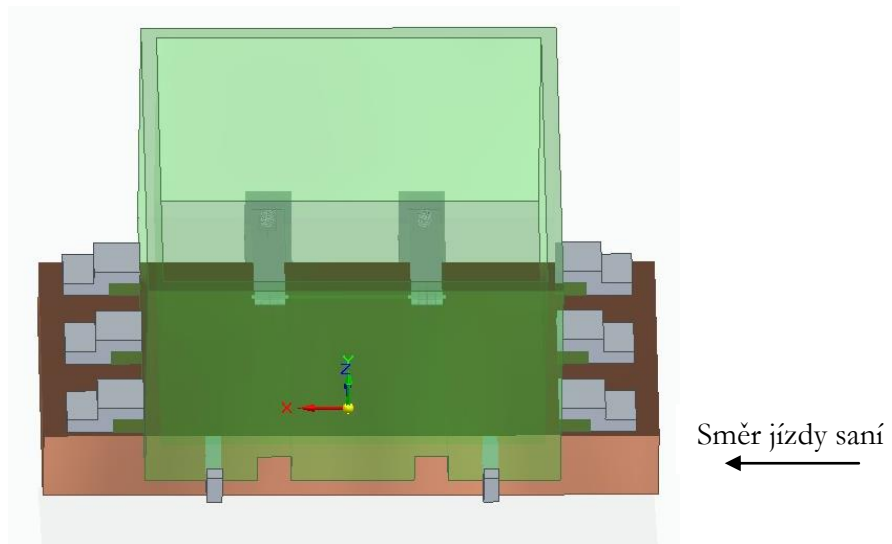
Na obrázku 17 je zobrazen návrh číslo 1 bez boxu a v řezu. Levá západka je v poloze před odjištěním – před vsunutím vidlí vysokozdvížného vozíku do prostoru pod boxem. Pravá západka je v poloze po odjištění boxu, po vsunutí vidlí do prostoru pod boxem.



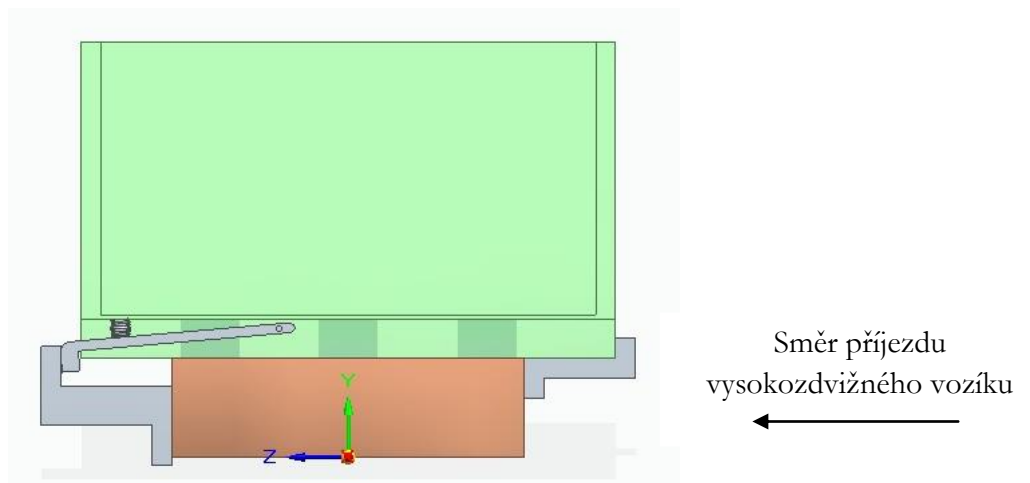
Obrázek 17 Návrh číslo 1 (nalevo – bez boxu, napravo – v řezu); hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.

Nevýhodou této varianty je možnost vzpříčení západek v drážkách během odjišťování. Další nevýhodou je pak obtížné ustavování západek do výchozí polohy, tedy do stavu, kdy je box pevně zajištěn na saních.

V návrhu číslo 2 (obrázek 18) je box ve směru jízdy saní (osa x) a ve směru kolmé na rovinu saní (osa y) uchycen pomocí šesti jistících prvků umístěných na okrajích boxu. Tato šestice jistících prvků je pevně uchycena k saním. Ve směru kolmém na směr jízdy (osa z) je box jištěn pomocí dvou západek, které jsou odjištěny při vsunutí vidlí vysokozdvížného vozíku do určených otvorů. Tvar a umístění západek je vidět na obrázku 19. Při vsunutí vidlí do prostoru pod boxem se západky, které jsou pružinou tlačeny dolů (směrem k saním), zvednou. Zvednutím dojde k odjištění celého boxu v příčném směru. Celý box se tedy může v příčném směru mírně posunout. Tím je box uvolněn ve dvou zbývajících směrech a může být odvezen mimo prostor laboratoře.



Obrázek 18 Návrh číslo 2; hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.

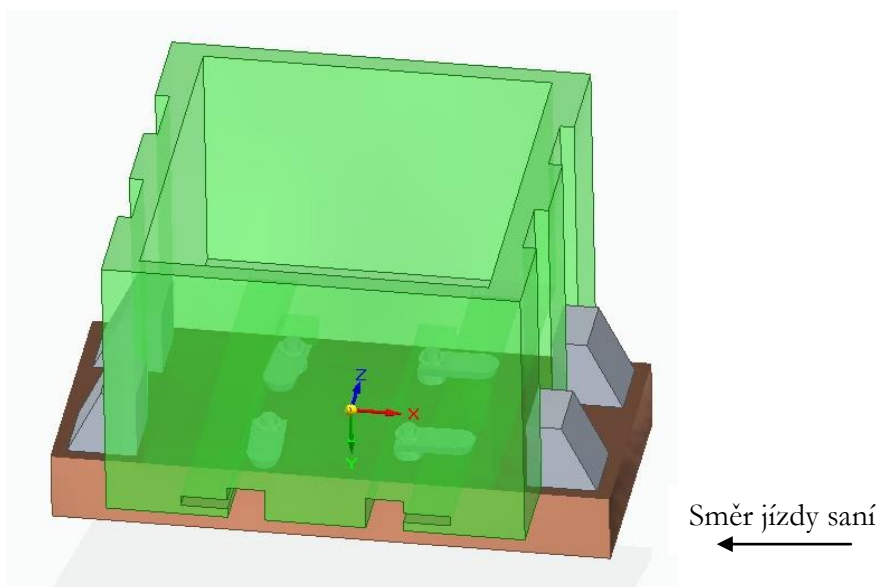


Obrázek 19 Návrh číslo 2 – řez; hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.

Nevýhodou tohoto návrhu je, že vysokozdvížný vozík musí být schopný celý box i s baterií (o hmotnosti přibližně 3 tuny) posunout, a teprve pak ho zvednout. Vzhledem k vysoké hmotnosti boxu s baterií a malému prostoru pro rozjezd vysokozdvížného vozíku by mohl být tento pohyb poměrně problematický.

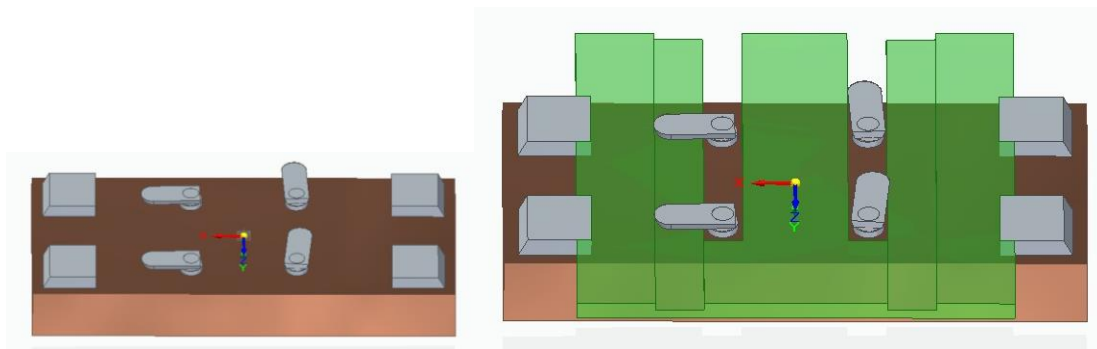
V návrhu číslo 3 (obrázek 20) je box ve směru jízdy saní (osa x) a v kolmém směru na jízdu saní (osa z) jištěn pomocí čtyř bloků. Tyto bloky jsou pevně uchyceny k saním. V kolmém směru na rovinu saní (osa y) je box jištěn pomocí čtyř západek, které jsou taktéž pevně uchyceny k saním. Západky mohou rotovat kolem osy upevnění (osy y). Dle předepnutí šroubu umístěného v ose otáčení západky je nastavena síla, kterou je potřeba vyvinout na otáčení západek.

Vsunutím vidlí vysokozdvížného vozíku do prostoru pod box jsou západky otočeny o 90 stupňů z původní polohy (stavu zajištění), tak je box ve svislém směru odjištěn. Může být tedy zvednut a odvezen.



Obrázek 20 Návrh číslo 3; hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.

Na obrázku 21 jsou v obou případech v levé části zobrazeny západky ve stavu, kdy je box jištěn k saním a v pravé části ve stavu po odjištění.



Obrázek 21 Návrh číslo 3; (nalevo – bez boxu, napravo – v podélném řezu); hnědá barva – saně, zelená barva – box, šedá barva – prvky sloužící k uchycení boxu.

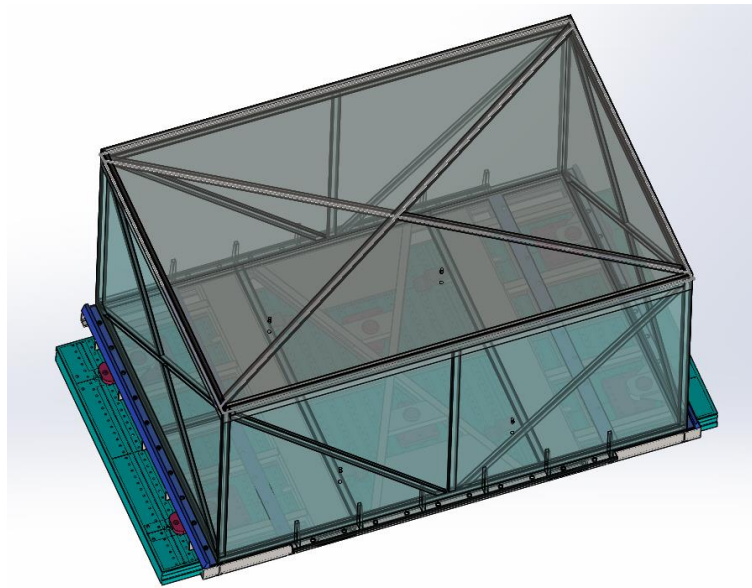
Nevýhodou této varianty je nebezpečí vzpříčení při zvedání boxu pomocí vysokozdvížného vozíku. Další nevýhodou je pak obtížné ustavení západek do výchozí, tedy zajištěné, polohy.

7.4 Výsledný návrh mechanického řešení

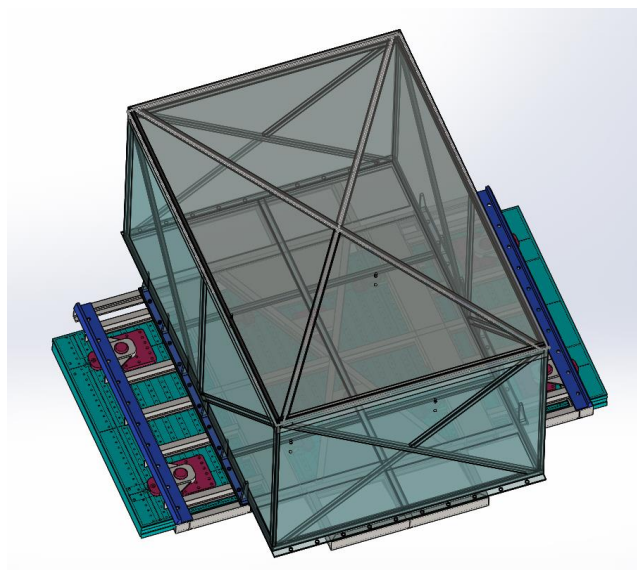
Výsledné řešení (obrázek 22, obrázek 23) je kombinací návrhu číslo 1 a návrhu číslo 3. Je navrženo po zohlednění všech výhod a nevýhod předchozích tří řešení. Při jeho návrhu je již zohledněno také rozmístění závitových děr na rastru saní, které jsou v laboratoři DYCOT. Dále je zohledněn i požadavek na možnost upevnění boxu na saně ve dvou na sebe kolmých směrech, tak aby se nemuselo mezi zkouškami měnit upevnění baterie uvnitř boxu.

Výsledné řešení bylo modelováno v programu Solid Works 2014.

Ve svislém směru je box jištěn pomocí západek (návrh číslo 3). Tato varianta je vhodnější než jištění ve svislém směru pomocí jisticích prvků na okraji boxu (návrh číslo 2), protože nevyžaduje posun boxu vysokozdvizným vozíkem v kolmém směru na směr jízdy saní. Nevýhoda jištění boxu pomocí západek však spočívá v ustavování západek do výchozí polohy před testem. Pod boxem je totiž velmi málo prostoru pro jakoukoliv manipulaci se západkami. Ve výsledném řešení je proto mezi saně a box včleněn ještě další prvek – rám. Rám splňuje oba hlavní požadavky, které byly původně kladeny na box. Během testu je pevně uchycen k saním a po testu je možné ho rychle ze saní sejmout. Na snadno odnímatelném rámu je pevně připevněn box.

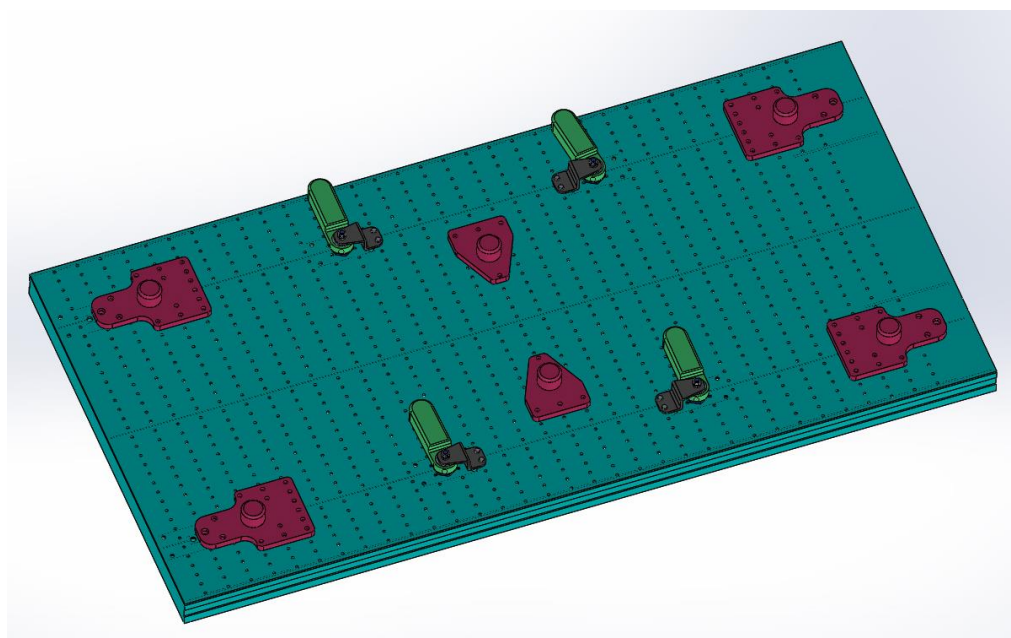


Obrázek 22 Návrh uchycení boxu k saním – podélný směr.

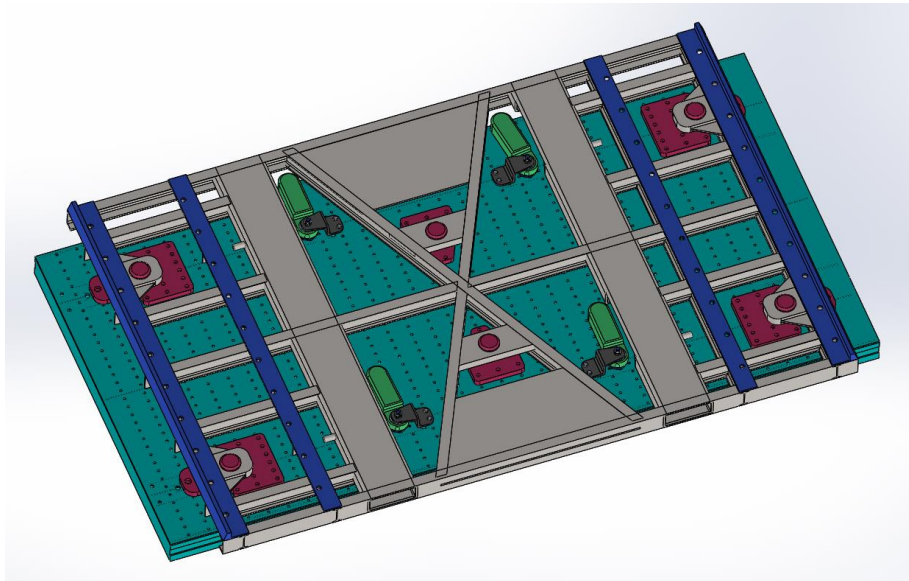


Obrázek 23 Návrh uchycení boxu k saním – příčný směr.

Při přípravě zkoušky je na saně nejdříve přišroubováno šest čepů. Tyto čepy brání pohybu rámu a boxu ve směru jízdy saní a ve směru kolmém na jízdu saní. Dále jsou na saně přišroubovány čtyři západky, které brání pohybu rámu s boxem ve směru kolmém na rovinu saní. Setrvání západek v požadované poloze během testu je zajištěno pomocí definovaného předpětí šroubu, který západku uchycuje k saním. Dále je západka jištěna, v poloze požadované pro testování plunžrem. Pokud je těchto deset prvků připravených na saních, dle obrázku 24, je na saně položen rám (obrázek 25).

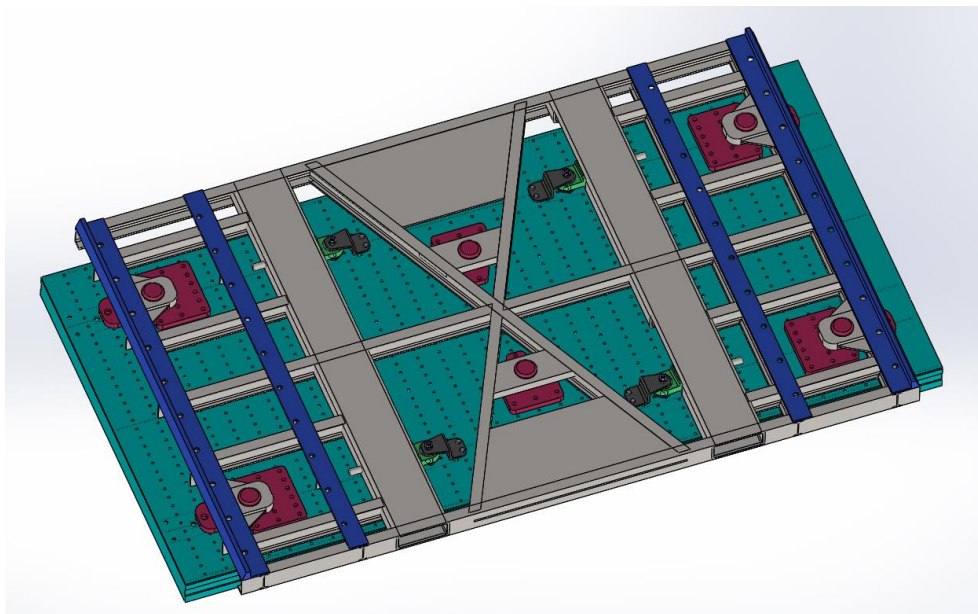


Obrázek 24 Zobrazení prvků, které jsou pevně uchyceny k saním.



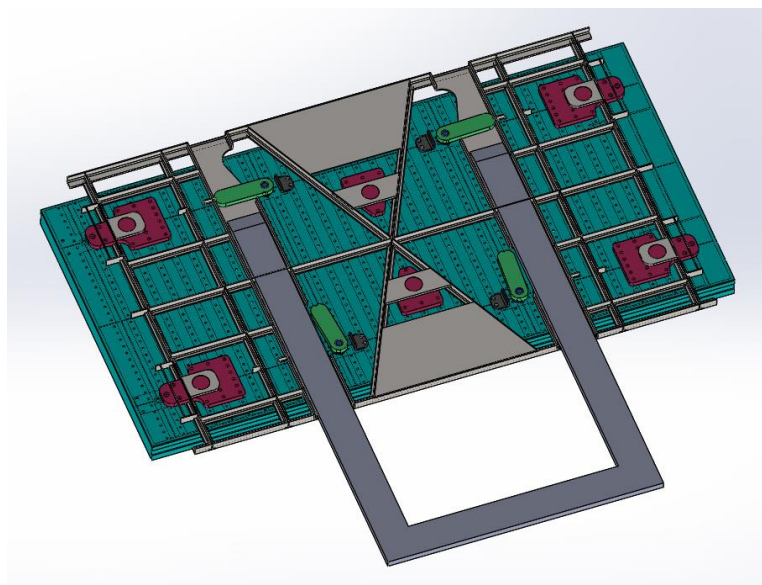
Obrázek 25 Zobrazení uložení rámu na saně.

Po uložení rámu na saně se zajistí jeho pohyb ve svislém směru pomocí západek tak, jak je zobrazeno na obrázku 26.



Obrázek 26 Zobrazení uložení rámu na saně, zajištění pomocí západek

Na následujícím obrázku 27 je pak zobrazen řez rámem v průběhu jeho odjišťování pomocí vidlí vysokozdvížného vozíku.



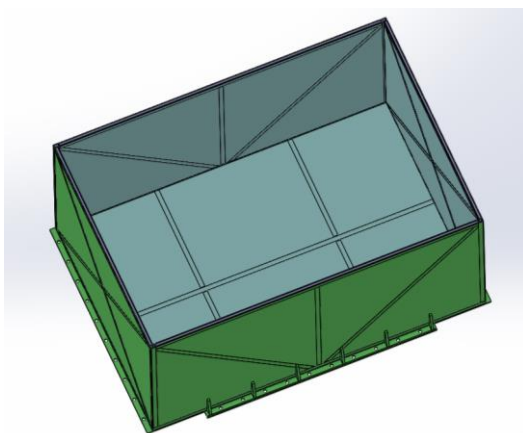
Obrázek 27 Řez rámem v průběhu odjišťování pomocí vidlí vysoko zdvižného vozíku.

Návrh boxu

Na základě rozměrů současně používaných baterií do autobusů, trolejbusů a automobilů, byly rozměry boxu stanoveny na 2 x 3 x 1 m tak, aby se do boxu vešly všechny baterie, jejichž rozměry se nám podařilo získat.

Stěny boxu jsou složeny ze tří vrstev. Vnější a vnitřní vrstva stěny je tvořena tenkým plechem (o tloušťce 1 až 2 mm). Střední vrstva je tvořena samonosnou konstrukcí z obdélníkových profilů. V prostoru mezi profily a tenkými plechy je umístěna žáruvzdorná izolace (přesný typ nebyl zatím specifikován).

V této fázi návrhu konstrukce není zatím ve dně boxu navržen žádný rastr se závitmi pro uchycení baterie. Návrh boxu (obrázek 28) je pouze přibližný, tak aby jej bylo možné použít pro pevnostní výpočty.



Obrázek 28 Návrh konstrukce boxu.

7.5 Konstrukce výsledného řešení

7.5.1 Kritická místa konstrukce

Vzhledem k tomu, že je rám svařovaný, může při jeho výrobě dojít ke zkroucení. Vlivem zkroucení se sníží přesnost umístění dílů s otvorem pro čepy. Ukládání rámu na saně pak může být poměrně obtížné.

Z důvodu výše uvedeného rizika bude při svařování rámu použita šablona. Tak bude snížen vznik výrobních nepřesností na minimum. Na čepích budou vytvořeny úkosy, které umožní jednodušší ukládání rámu na saně. Díky těmto dvěma opatřením by měl být problém obtížného ukládání rámu na saně minimalizován.

Čepy, které zajišťují rám ve směru pohybu saní a v kolmém směru na pohyb saní, zachycují rám částečně i ve směru kolmém na plochu saní. Pokud by došlo k deformaci rámu a jeho mírnému zvednutí, mohlo by v místě uchycení rámu pomocí čepů dojít k vzpříčení. Vzhledem k ošetření povrchu čepů mazivem je však i toto riziko sníženo.

7.5.2 Přednosti konstrukce

Předností výsledné konstrukce složené z rámu a boxu je možnost snadného ustavení západek do výchozí polohy před testem. Další výhodou je možnost upevnění boxu na saně ve dvou na sebe kolmých směrech, takže se nemusí měnit poloha baterie uvnitř boxu. Tato varianta umožňuje upevnění i malého čtvercového boxu o rozměrech 2 x 2 m pro testování menších baterií. Konstrukce rámu s boxem má i přijatelnou hmotnost, přibližně 2 000 kg (bez baterie).

7.6 Návrhové výpočty konstrukce

Klíčová kontrola pevnosti spojovacích prvků byla provedena ve výpočetním programu Pam – Crash. Základní návrhové výpočty byly však provedeny analyticky. Hmotnosti používané ve výpočtech jsou hmotnosti jednotlivých dílů dle CAD modelů, které jsou mírně navýšeny z důvodu bezpečnosti. Ve všech výpočtech je uvažováno zrychlení 280 m.s^{-2} , což je nejvyšší zrychlení předepsané normou EHK 100.

Byla provedena kontrola na střiž u šesti čepů držících rám na saních. Všechny čepy mají průměr 100 mm a jsou vyrobeny z oceli S355.

$$F = m \cdot a = 4000 \cdot 280 = 1\,120\,000 \text{ N}$$

$$S_{\text{čepy}} = 6 \cdot \pi \cdot \left(\frac{100}{2}\right)^2 = 47\,124 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\text{čepy}} = \frac{F}{S_{\text{čepy}}} = \frac{1\,120\,000}{47\,124} = 24 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d = \frac{\sigma_k}{k} = \frac{355}{1} = 355 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{dovolené}} = 0,65 \cdot \sigma_d = 0,65 \cdot 355 = 230 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{čepy}} \leq \tau_{\text{dovolené}}$$

F – zatěžující síla, m – hmotnost (rám, box, baterie), a – zrychlení, $S_{\text{čepy}}$ – plocha průřezu čepů, $\tau_{\text{čepy}}$ – smykové napětí na čepích, $\tau_{\text{dovolené}}$ – dovolené smykové napětí, σ_d – dovolené napětí, σ_k – napětí na mezi kluzu, k – bezpečnost

Dále byla provedena kontrola na střiž u šroubů, kterými je šestice čepů k saním uchycena. Tyto šrouby patří do pevnostní třídy 8.8, jejich velikosti jsou M12 (celkový počet 56), M16 (celkový počet 4) a M24 (celkový počet 4).

$$F = m \cdot a = 4000 \cdot 280 = 1\,120\,000 \text{ N}$$

$$S_{\text{šrouby}} = 56 \cdot \pi \cdot \left(\frac{9,853}{2}\right)^2 + 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{13,546}{2}\right)^2 + 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{20,319}{2}\right)^2 = 6\,143 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\text{šrouby}} = \frac{F}{S_{\text{šrouby}}} = \frac{1\,120\,000}{6\,143} = 182 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d = \frac{\sigma_k}{k} = \frac{640}{1} = 640 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{dovolené}} = 0,65 \cdot \sigma_d = 0,65 \cdot 640 = 416 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{šrouby}} \leq \tau_{\text{dovolené}}$$

F – zatěžující síla, m – hmotnost (rám, box, baterie), a – zrychlení, $S_{\text{šrouby}}$ – plocha průřezu jader šroubů, $\tau_{\text{šrouby}}$ – smykové napětí na šroubech, $\tau_{\text{dovolené}}$ – dovolené smykové napětí, σ_d – dovolené napětí, σ_k – napětí na mezi kluzu, k – bezpečnost

Na stříh byly zkontrolovány i šrouby, kterými je box přichycen k rámu. Těchto šroubů je celkem dvacet, jejich velikost je M24 a pevnostní třída 8.8.

$$F = m \cdot a = 3500 \cdot 280 = 980\,000 \text{ N}$$

$$S_{\text{šrouby}} = 20 \cdot \pi \cdot \left(\frac{20,319}{2}\right)^2 = 6\,485 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\text{šrouby}} = \frac{F}{S_{\text{šrouby}}} = \frac{980\,000}{6\,485} = 151 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d = \frac{\sigma_k}{k} = \frac{640}{1} = 640 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{dovolené}} = 0,65 \cdot \sigma_d = 0,65 \cdot 640 = 416 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{šrouby}} \leq \tau_{\text{dovolené}}$$

F – zatěžující síla, m_2 – hmotnost (box, baterie), a – zrychlení, $S_{\text{šrouby}}$ – plocha průřezu jader šroubů, $\tau_{\text{šrouby}}$ – smykové napětí na šroubech, $\tau_{\text{dovolené}}$ – dovolené smykové napětí, σ_d – dovolené napětí, σ_k – napětí na mezi kluzu, k – bezpečnost

Nakonec byly na stříh zkontrolovány i čepy spojující spodní a horní část boxu. Jejich průměr je 15 mm a počet 8. Tyto čepy jsou stejně jako zbytek konstrukce vyrobeny z oceli S355.

$$F = m \cdot a = 800 \cdot 280 = 224\,000 \text{ N}$$

$$S_{\text{čepy}} = 8 \cdot \pi \cdot \left(\frac{15}{2}\right)^2 = 1\,413 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\text{šrouby}} = \frac{F}{S_{\text{šrouby}}} = \frac{224\,000}{1\,413} = 159 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d = \frac{\sigma_k}{k} = \frac{355}{1} = 355 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{dovolené}} = 0,65 \cdot \sigma_d = 0,65 \cdot 355 = 230 \text{ MPa}$$

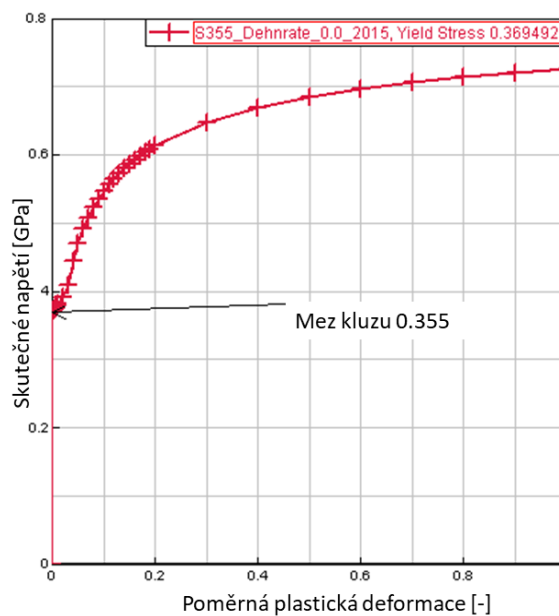
$$\tau_{\text{čepy}} \leq \tau_{\text{dovolené}}$$

F – zatěžující síla, m – hmotnost (horní část boxu), a – zrychlení, $S_{\text{čepy}}$ – plocha průřezu čepů, $\tau_{\text{šrouby}}$ – smykové napětí na šroubech, $\tau_{\text{dovolené}}$ – dovolené smykové napětí, σ_d – dovolené napětí, σ_k – napětí na mezi kluzu, k – bezpečnost

Z výpočtů je vidět, že všechna kontrolovaná místa na střih vyhověla. Napětí ve všech spojích je výrazně menší než dovolené napětí.

7.7 Pevnostní výpočty konstrukce

Pevnostní výpočty byly prováděny ve výpočetním programu Pam – Crash od ESI Group. Nejdříve byl model z programu Solid Works převeden do formátu STEP a načten v pre-processoru ANSA. Tenkostěnné součásti z modelu byly převedeny na typ elementu Shell. V modelu se tedy tyto elementy zobrazují bez tloušťky, ta je uložena v jejich vlastnostech. Následně byla na částech typu Shell vytvořena čtvercová síť o velikosti hrany 8 mm. Tlustostěnné součásti byly modelovány jako Solid (objemový element). Dle tvaru jsou součásti typu Solid vyplněny tetrastěny, pentastěny nebo hexastěny. Součástí typu Shell i Solid byly přiřazeny vlastnosti oceli S355, ze které má být celý upevňovací systém vyroben. Materiálová křivka oceli S355 je zobrazena na obrázku 29.



Obrázek 29 Materiálová křivka oceli S355.

Spojení mezi profily tvořící rám a pásy plechů, které na něj ze shora dosedají, je modelováno pomocí entity Plink. Plink definuje na síti nezávislé, bodové spojení ekvivalentní s bodovým svarem. Entita Plink dokáže přenést ohybový moment. Elementy Plink mohou však způsobovat nereálný vzrůst lokálního napětí v místě jejich upevnění. Ve sporných místech, kde nebylo jasné, zda je vzrůst napětí způsoben pouze přítomností entit Plink, nebo zda jde skutečně oblast s lokálním vzrůstem napětí, byly entity Plink nahrazeny entitou Tied. Tied je vazba, která simuluje lepený spoj. Entita Tied na rozdíl od Plink nezpůsobuje lokální koncentraci napětí.

Šroubová spojení mezi rámem a boxem a mezi saněmi a čepy jsou modelována pomocí elementu Rigid body a elementu Beam. Rigid body je element s nekonečnou tuhostí definován na množině uzlů. Element Rigid body přenáší momenty a je vhodný jen pro explicitní způsob výpočtu. Element Beam umožňuje přenos axiálních a smykových sil i ohybového a krouticího momentu. Na elementu Beam je v modelu definováno předpětí odpovídající plánovanému předpětí na skutečných šroubech. Na šroubech M12 je to 32 kN, na šroubech M16 60 kN a na šroubech M24 135 kN. Všechny použité šrouby jsou z pevnostní třídy 8.8, jejich mez kluzu je tedy přibližně 640 MPa a dovolené smykové napětí pak 416 MPa.

$$F = \tau_{dovolené} \cdot S = 416 \cdot \pi \cdot \left(\frac{9,853}{2}\right)^2 = 32 \text{ kN}$$

$$F = \tau_{dovolené} \cdot S = 416 \cdot \pi \cdot \left(\frac{13,546}{2}\right)^2 = 60 \text{ kN}$$

$$F = \tau_{dovolené} \cdot S = 416 \cdot \pi \cdot \left(\frac{20,319}{2}\right)^2 = 135 \text{ kN}$$

F – předpětí šroubu, $\tau_{dovolené}$ – dovolené smykové napětí, S – plocha jádra šroubu

S ohledem na konstrukci baterií byla hmota představující baterii modelována jako rigidní, bez možnosti deformace. U vozidel kategorie M1 a N1 je při testech požadováno zrychlení 28 g. Hmotnost baterií do této kategorie vozidel však není v normě definována. V současné době se nejtěžší baterie do této kategorie vozidel pohybují kolem 600 kg (Tesla Model S) až 700 kg (Audi e-tron). V pevnostních výpočtech navržené konstrukce byla tedy použita baterie o hmotnosti 900 kg. Tato baterie byla ke dnu boxu připevněna pomocí entity Mtoco. Entita Mtoco umožňuje spojení více závislých uzlů k jednomu nezávislému uzlu.

Dále byly v prostředí Visual-Crash PAM 12.0.0. nastaveny kontakty mezi jednotlivými částmi modelu. Na čepch byl nastaven kontakt, který umožňuje pohyby rámu ve svislém směru, ale neumožňuje kolizi hmoty čepu a části rámu, do které zapadá. Mezi šesti čepy a rámem byl nastaven vzájemný kontakt, který umožňuje posunutí rámu ve svislém směru, ale nedovoluje proniknutí rámu do hmoty čepu. Mezi západkami a saněmi, západkami a profilem, do kterého západky vjíždějí, západkami a vyztužením jejich upevnění a čepy západek a saněmi byl taktéž nastaven kontakt zabraňující vzájemnému proniknutí těchto součástí. Všechny tyto kontakty byly typu 33 (Contact Type 33 – Symmetric Node-to-segment contact with Edge Treatment). Kontakt typu 33 je kontakt „Master-Slave“, během výpočtu je kontrolována penetrace uzlů součásti „slave“ do segmentů/hran součásti „master“. Na zbytku součástí byl nastaven „self“ kontakt typu 36 (Self-Impacting Node-to-Segment Contact with Edge Treatment). Kontakt typu 36 se používá, pokud není dopředu známa kontaktní situace, při jeho definici se označuje pouze

jeden z povrchů. Kontakt typu 36 je často používán u nárazových simulací, kde nastávají velké deformace.

Příklady nastavení kontaktů typu 33 a 36 jsou zobrazeny na obrázcích 30 a 31.

CNTAC /						
CNTAC /	IDCTC	NTYPE				
	9000000	33				
NAME	packy					
T1SL	T2SL	ISENS	Hcont	ITPRT		
0.	0.	0	0.	1		
IPCP	SLFACM	FSVNL	IKFOR	PENKIN	TLSTIF	
---	0.1	0.	0	0.		
FRICT	IDFRIC	XDMP1	ICOUFR	IDCNTPTY		
0.1	0	0.1	0	0		
IRMV	IEROD	ILEAK	IAC32	IFRED	DTHKPLK	ADJTOL
2	---	0	0	---		
BLANK	SEPSTR	SEPTHK				
BLANK	TSCAL	IPRES				
		0				

Obrázek 30 Nastavení kontaktu typu 33.

CNTAC /						
CNTAC /	IDCTC	NTYPE				
	1	36				
NAME	self					
T1SL	T2SL	ISENS	Hcont	ITPRT		
0.	0.	0	0.	1		
IPCP	SLFACM	FSVNL	TLSTIF			
---	0.1	0.				
FRICT	IDFRIC	XDMP1	ICOUFR			
0.1	0	0.1	---			
IRMV	IEROD	ILEAK	IAC32	IOMIT	IFRED	DTHKPLK ADJTOL
2	---	0	0	---	---	
BLANK	TSCAL	IPRES				

Obrázek 31 Nastavení kontaktu typu 36.

IDCTC je identifikační číslo kontaktu, NTYPE je typ kontaktu. T1SL=0 a T2SL=0 značí, že kontakt zůstává aktivní až do konce výpočtu. ISENS označuje číslo sensoru. Sensor se používá pro „zapnutí“ nebo „vypnutí“ kontaktu během výpočtu. Hcont označuje kontaktní tloušťku, tato tloušťka je definována vzdáleností od kontaktní plochy, na které skutečně nastává fyzický kontakt dvou součástí. ITPRT=0 znamená, že ke kontaktu dochází ve vzdálenosti Hcont od reálného povrchu dvou součástí. ITPRT=1 znamená, že je dovolena nulová kontaktní tloušťka dvou povrchů. SLFACM je penaltový faktor, pokud je tento faktor menší než 0,1 může způsobit perforaci součástí. Pokud je výrazně větší, může způsobit nestabilitu při výpočtu. FSVNL určuje, jakým způsobem se zvětšuje penaltová síla při postupně se zvětšující se penetraci na hodnotu Hcont. Pokud je hodnota FSVNL nula, pak síla v kontaktu vrůstá při postupné penetraci lineárně. IKFOR=0 znamená, že nejsou ve výpočtu započítávány kinematické síly. Pomocí faktoru PENKIN jsou případně

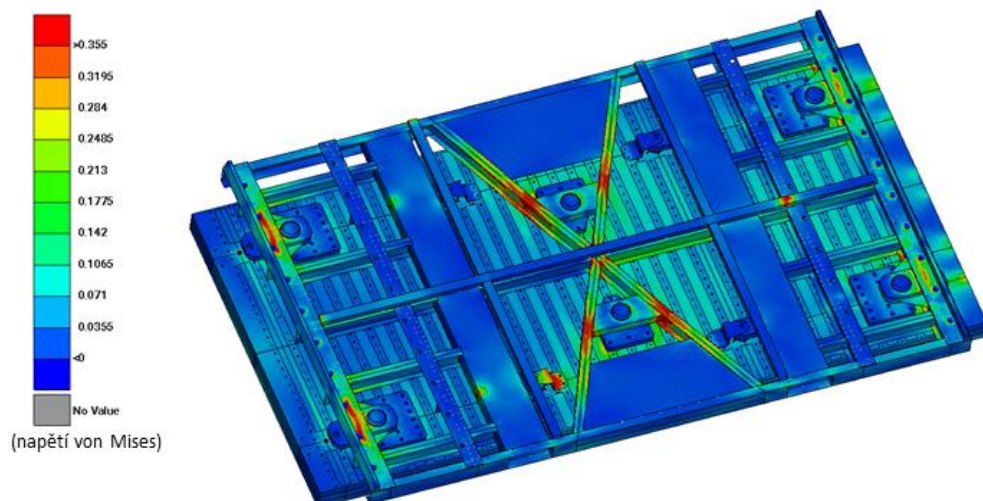
nastavovány kinematické síly, v případě jejich zahrnutí do výpočtu. FRICT definuje tření. Protože definujeme tření mezi dvěma kovovými materiály, je jeho hodnota nastavena na 0,1. Nastavením IDFRIC na hodnotu nula vyjadřujeme, že při výpočtu nemá být použito pokročilého modelu tření. XDMP1 je číslo menší než jedna a určuje poměrný útlum. ICOUFR umožňuje nastavit parametry Coulombova tření. IDCNTPTY je identifikační číslo vlastnosti kontaktu. IRMV=2 znamená, že lokální kontaktní tloušťka má být na počátku výpočtu modifikována tak, aby nedocházelo k počátečním penetracím. ILEAK umožňuje nastavení airbagů. IAC32 automaticky zajišťuje kompatibilitu s prvky SLINK, ELINK a TIED. IAC32=0 značí, že dochází k automatické reaktivaci v případě selhání kontaktu. IPRES=0 značí, že přitlak je zohledněn v tlakovém napětí.

Po nastavení kontaktů následoval samotný výpočet. Výpočet probíhal v řešiči Pam – Crash.

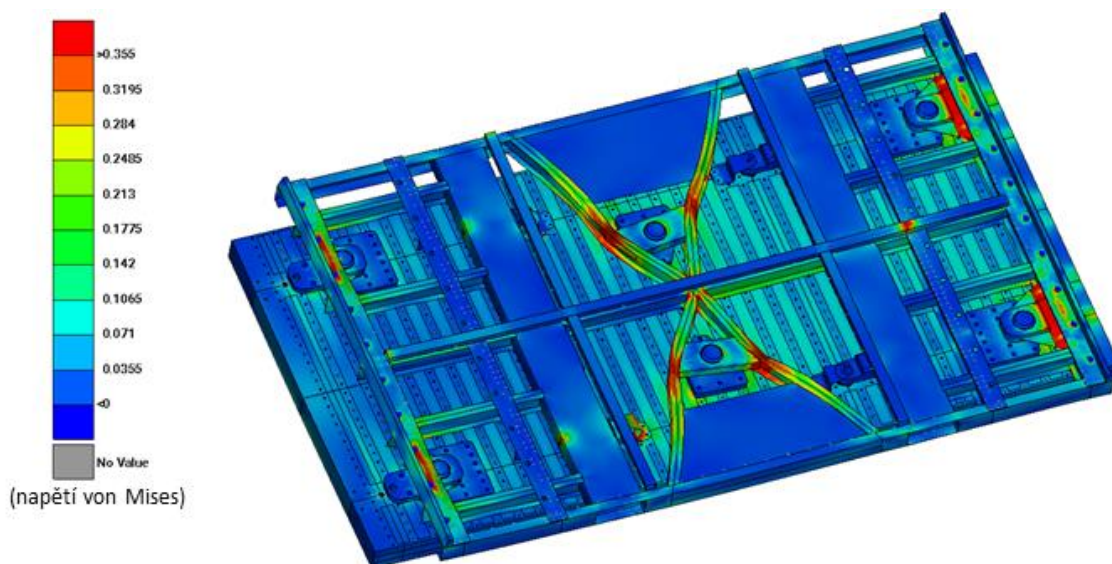
Výsledky výpočtů byly analyzovány v post-processoru META a jsou rozebrány níže.

7.7.1 První výpočet – podélný box

Na obrázku 32 je zobrazen výsledek prvního výpočtu. Maximální napětí na stupnici (červená barva) je nastaveno na hodnotu 355 MPa, což je mez kluzu oceli S355. Na rámu byl při výpočtu umístěn box v podélném směru. V boxu byla uchycena baterie o hmotnosti 900 kg a maximální zrychlení během pulzu bylo 28 g. Obrázek v každém místě rámu zobrazuje nejhorší stav napjatosti, který během celého pulzu nastane. Již z tohoto prvního obrázku je vidět, že na rámu je několik kritických míst. Prvním takovým místem je střední kříž rámu, dále oblast v okolí čepů a oblast kolem uchycení západek. Na obrázku 33 je znovu zobrazen rám ze stejného výpočtu, tentokrát ve stavu, kdy dochází k zvyšování zrychlení saní. Deformace jsou na tomto obrázku zvětšeny desetkrát. Díky zvětšení deformací je vidět, jaký pohyb rám na saních vykonává a lze snadněji odhadnout, čím je způsoben nárůst napětí v jednotlivých oblastech.



Obrázek 32 Rám – první výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.

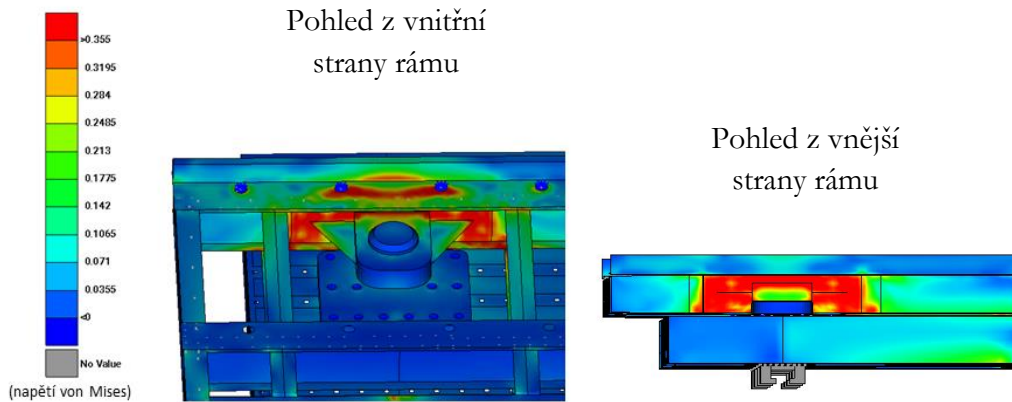


Obrázek 33 Rám – první výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí, deformace 10x zvětšené.

V místě, kde je na profil tvořící rám navařena součást, do které zapadá čep, dochází na profilu k velkému nárůstu napětí. Toto napětí je koncentrované na malé oblasti, neroznáší se do okolí.

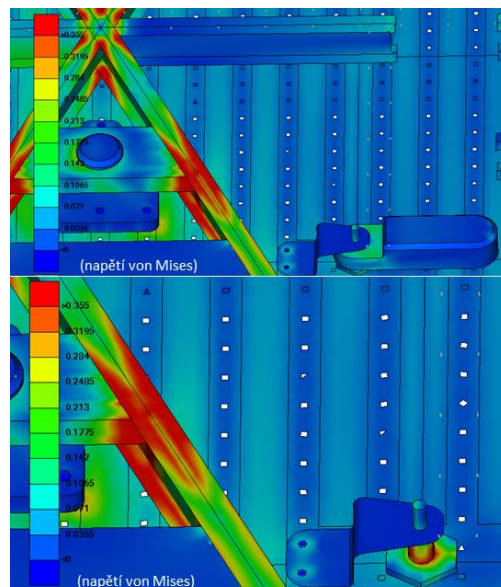
V průběhu pulzu působí na baterii uvnitř boxu velký klopný moment, v důsledku toho je zadní část rámu namáhána na tlak a přední část rámu namáhána na ohyb. Přední část rámu se ohýbá. Rám má tendenci se zvedat, čepy ho zachycují v původní poloze. V místě svaření součásti, do které zapadá čep, k profilu, tedy dochází k vysokému namáhání (obrázek 34).

Profil je navíc v blízkosti svaru ještě oslaben, protože je z něj v tomto místě odříznuta spodní část. Odříznutí profilu je nezbytné pro správné uložení rámu na saně, na kterých jsou již našroubované čepy.



Obrázek 34 Detail rámu, čepy – první výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.

Vlivem velkého klopného momentu dochází k vysokému namáhání čepů držících západky. Další příčinou vysokého namáhání čepů může být i celkové kroucení rámu ve střední oblasti. Lokální vzrůst napětí na čepěch je zobrazen na obrázku 35.

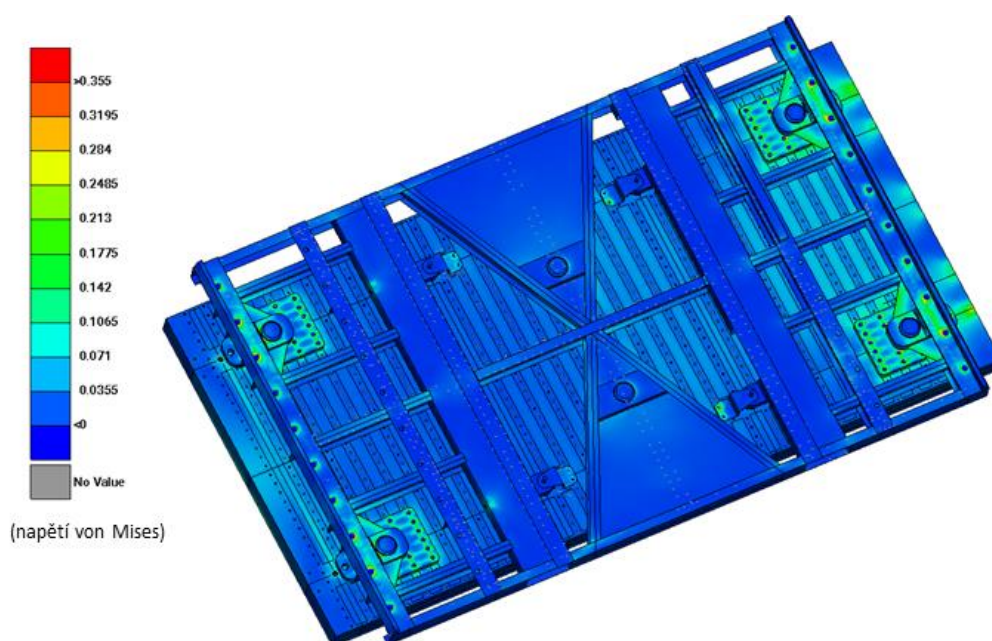


Obrázek 35 Detail rámu, západky – první výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.

7.7.2 Závěrečný výpočet – podélný box

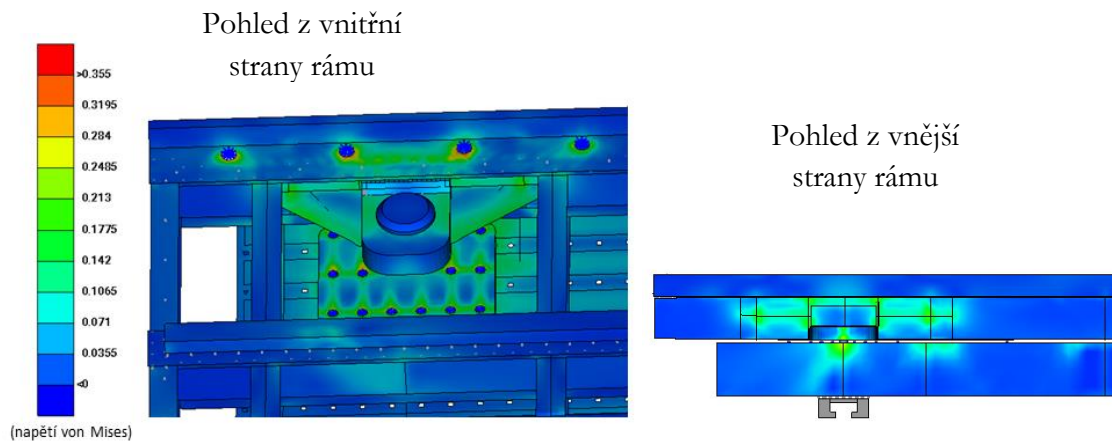
Mezi prvním a závěrečným výpočtem bylo provedeno deset iterací, během kterých byla postupně vyztužována kritická místa. Úpravy kritických míst byly prováděny s ohledem na výslednou pevnost rámu, nízkou hmotnost, vyrobitelnost a snadnou montáž. Na obrázku 36 je zobrazen rám po úpravách. Maximální napětí na stupnici (červená barva) je opět nastaveno na 355 MPa. Na rámu byl při výpočtu umístěn box v podélném směru. V boxu byla upevněna baterie o hmotnosti 900 kg a maximální zrychlení během pulzu bylo 28 g. Obrázek v každém místě rámu zobrazuje nejhorší stav napjatosti, který během celého pulzu nastane. Z obrázku je vidět, že se postupnými úpravami podařilo vyztužit všechna kritická místa z prvního výpočtu.

Vysoké napětí v oblasti středového kříže bylo sníženo pomocí protažení zavětrování až do středu rámu.



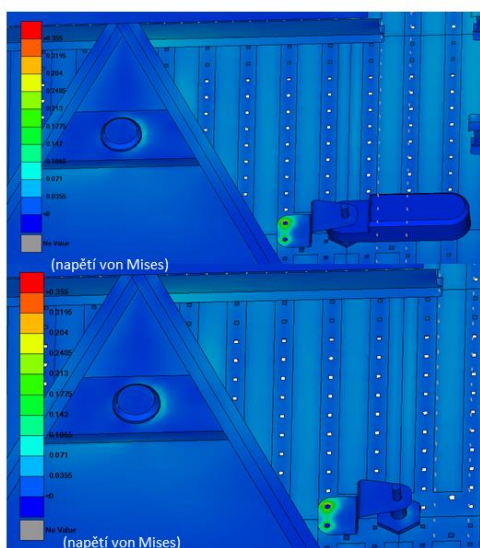
Obrázek 36 Rám – poslední výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.

Zvýšené napětí v oblasti kolem čepů (obrázek 37) bylo rozneseno do okolí úpravou několika prvků. Dvě žebra navazující na součást, do které zapadá čep, byla protažena tak, aby mohla být přivařena nejen k profilu, který je umístěn napříč saní, ale i ke dvěma podélným profilům. Tak došlo k výraznému zpevnění žebra a zvýšila se jeho schopnost roznášet napětí. Tvar součásti, do které zapadá čep, byl změněn. Tloušťka této součásti je v blízkosti příčného profilu, ke kterému je součást navařena, postupně navyšována. Tím se zvětšila výsledná dosedající plocha této části na profil. Z vnější strany rámu byla na profil navíc přivařena další dvě žebra (u každého čepu). Tato žebra zpevňují profil právě v místě, kde je k profilu z vnitřní strany rámu navařena součást, do které zapadají čepy.



Obrázek 37 Detail rámu, čepy – poslední výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.

Vlivem zpevnění oblasti středového kříže a oblasti v okolí čepů došlo i k výraznému snížení namáhání čepů držících západky (obrázek 38).

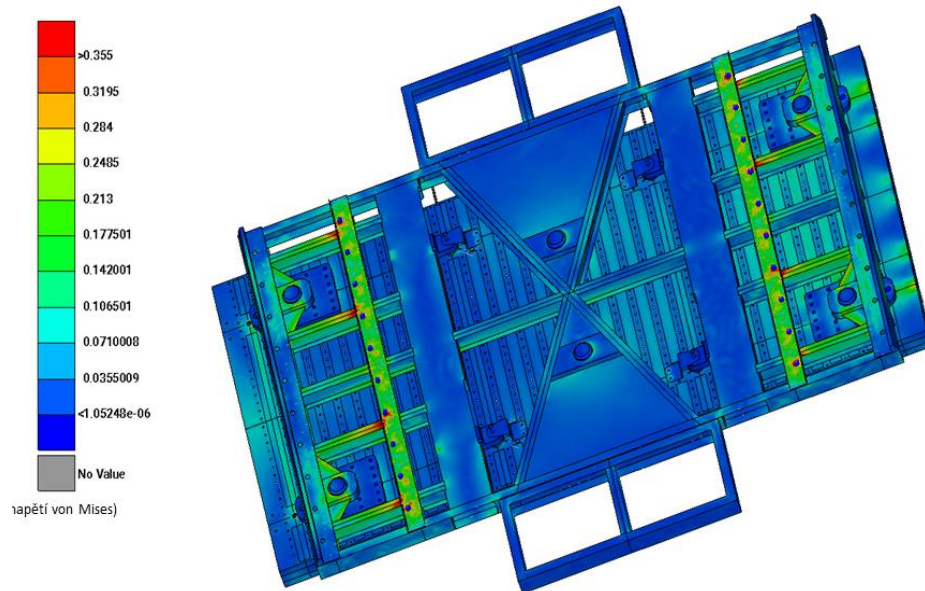


Obrázek 38 Detail rámu, západky – první výpočet, box umístěn v podélném směru, stav při maximálním napětí.

7.7.3 První výpočet – příčný box

Na obrázku 39 je zobrazen výsledek prvního výpočtu. Při výpočtu byl box umístěn na rámu v příčném směru. Maximální napětí na stupnici (červená barva) je nastaveno na 355 MPa. V boxu byla uchycena baterie o hmotnosti 900 kg a maximální zrychlení během pulzu bylo 28 g. Pro výpočet byla použita již upravená konstrukce rámu z výpočtů, ve kterých byl box umístěn v podélném směru.

Obrázek zobrazuje v každém místě rámu nejhorší stav napjatosti, který během celého pulzu nastane. Kritickými místy jsou opět oblasti kolem čtyř čepů v rozích saní. Dalším kritickým místem je oblast kolem uchycení boxu k rámu. Ke zvýšenému namáhání nedochází jen na pásu plechu, za který je box k rámu přišroubován, ale i na profilech v blízkosti tohoto uchycení.

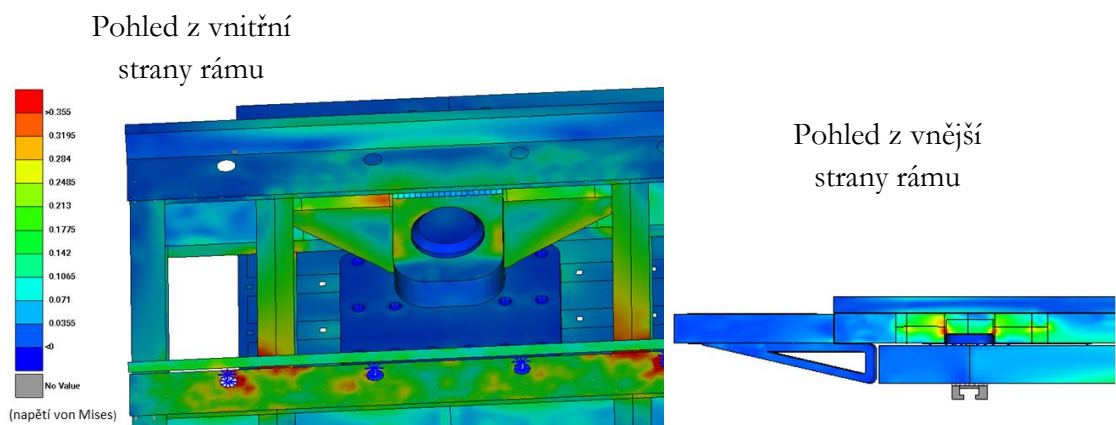


Obrázek 39 Rám – první výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.

Na obrázku 39 je dále vidět, že pro příčné umístění boxu na saně byl rám ještě rozšířen o dvě boční podpěry po jeho stranách. Z výpočtu je však patrné, že na tyto podpěry nepůsobí žádné napětí.

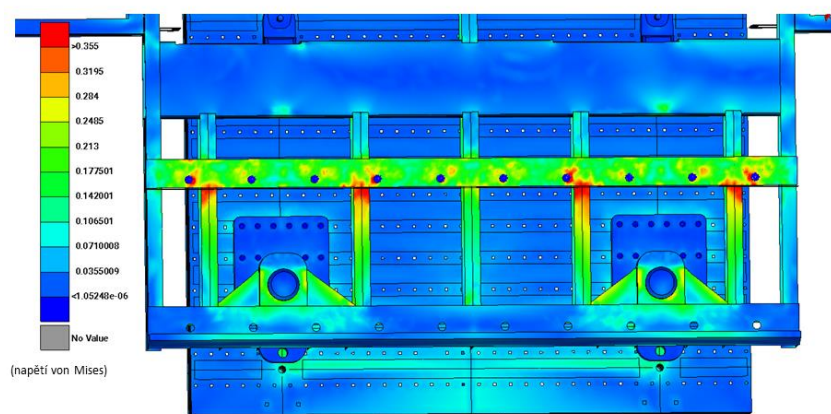
Stejně tak na zavětrování ve středu rámu, konkrétně v jeho částech poblíž boků saní, nebylo pozorováno zvýšené napětí. V této oblasti nebylo pozorováno zvýšené napětí ani ve výpočtu, při kterém byl box umístěn na rám v podélném směru. Zavětrování v této oblasti bylo tedy v dalších výpočtech zredukováno.

Pohled na čelo rámu (obrázek 40) ukazuje, že ani po provedení úprav u rámu s podélně umístěným boxem, není napětí v oblasti čepů pod mezí kluzu. Tuto oblast tedy bude ještě nutné vyztužit.



Obrázek 40 Čelo rámu – první výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.

Na obrázku 41 je v detailu zobrazeno místo, kde je k rámu uchycen box. Zvýšené napětí v okolí šroubů je způsobeno nastavením předpětí ve šroubech ve výpočetním modelu. Zvýšené napětí na čtyřech podélných profilech už je však způsobeno zatížením tíhou boxu a působením klopného momentu na box.

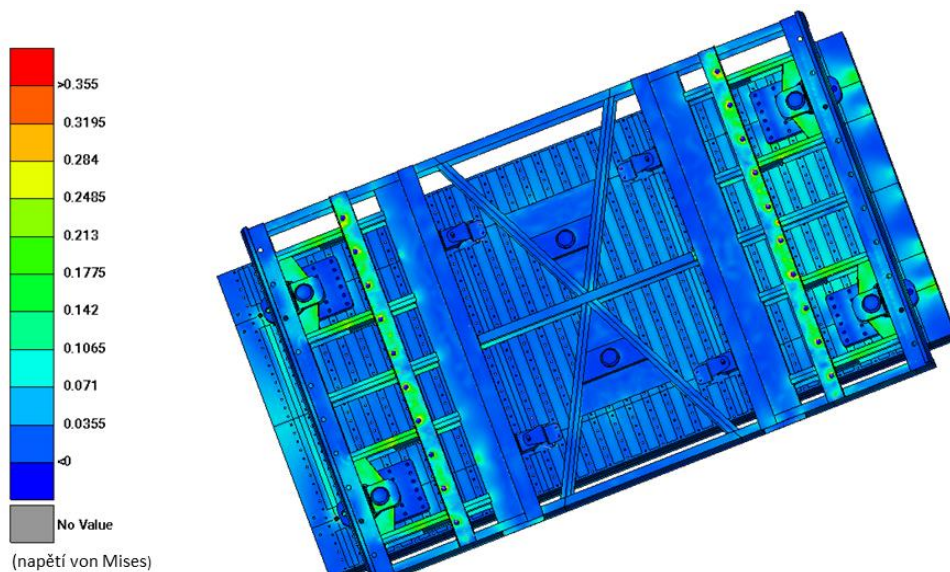


Obrázek 41 Detail rámu - čepy a místo uchycení boxu – první výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.

7.7.4 Závěrečný výpočet – příčný box

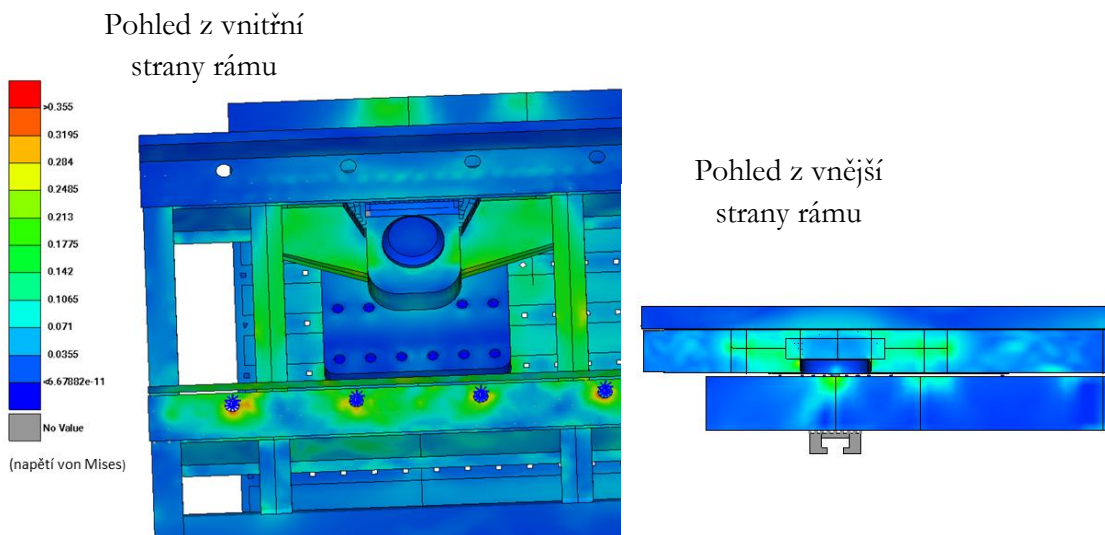
Na obrázku 42 je zobrazen rám po provedení úprav. Při výpočtu byl box umístěn na rámu v příčném směru. Maximální napětí na stupnici (červená barva) je nastaveno na 355 MPa. V boxu byla umístěna baterie o hmotnosti 900 kg a maximální zrychlení během pulzu bylo 28 g. Obrázek zobrazuje v každém místě rámu nejhorší stav napjatosti, který během celého pulzu nastane.

Boční podpěry, které nebyly zatíženy, jsou v tomto závěrečném výpočtu již odebrány. Zredukované je i zavětrování střední části rámu.



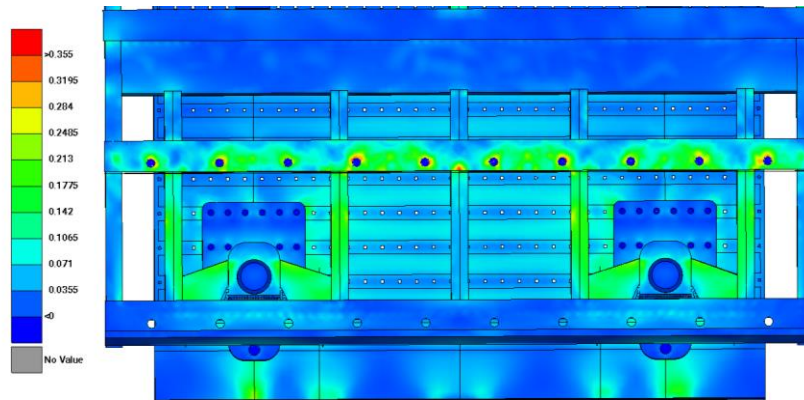
Obrázek 42 Rám – poslední výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.

Oblast v okolí čepů byla naopak vyztužena (obrázek 43). Součást, do které zapadají čepy, byla v blízkosti příčného profilu, na který je navařena, rozšířena tak, aby nezatěžovala pouze průřezem oslabenou část profilu. Žebra, která na tuto součást navazují, byla ještě více protažena, aby lépe roznášela napětí jak do příčného profilu, tak do profilů podélných. Navíc jsou v této variantě na dosud volné hrany žeber navařeny pásy plechu, které zvyšují tuhost žeber.



Obrázek 43 Čelo rámu – poslední výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.

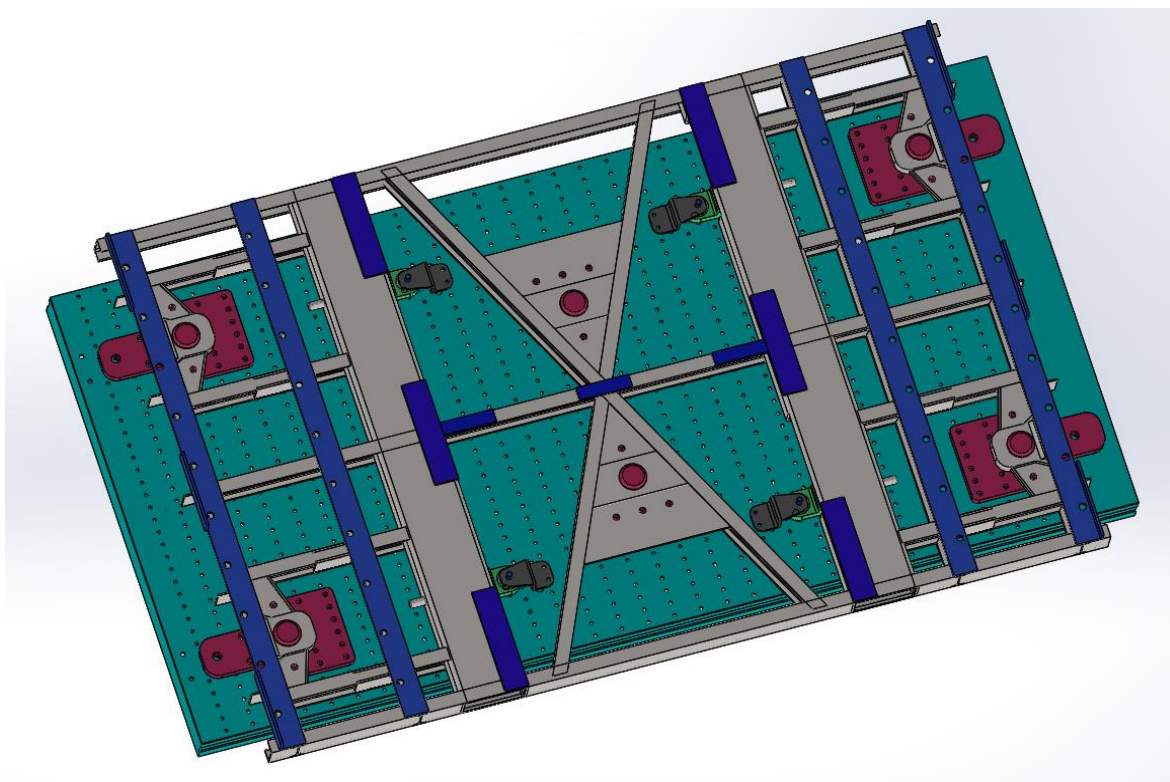
Oblast v okolí uchycení boxu k rámu byla vyztužena díky uzavření části čtyř profilů, které byly nejvíce namáhány. Rozložení napětí v oblasti uchycení boxu k rámu, po uzavření profilů navařenými plechy je zobrazeno na obrázku 44. Uzavření profilů je vidět na obrázcích 45 a 46.



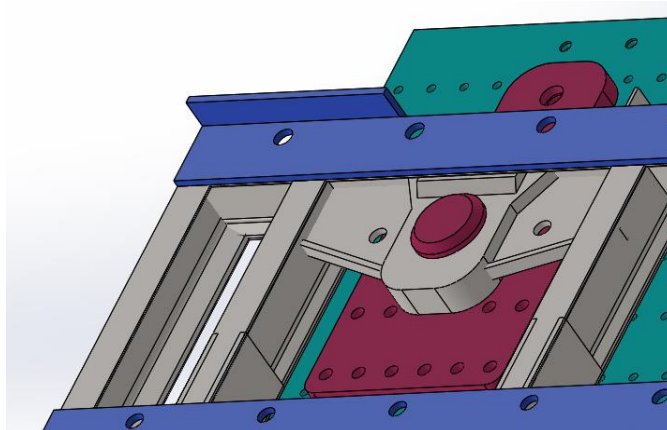
Obrázek 44 Detail rámu - čepy a místo uchycení boxu – poslední výpočet, box umístěn v příčném směru, stav při maximálním napětí.

7.8 Konstrukce po provedení úprav na základě výpočtů

Na obrázku 45 a obrázku 47 je zobrazena finální konstrukce rámu a boxu, která vznikla po provedení změn na původní konstrukci během výpočetní fáze. Oproti původní konstrukci je v ní odlehčeno zavětrování ve střední části rámu. Součást, do které zapadají čepy, je zvětšena, tak aby lépe roznášela napětí a nezatěžovala příčný profil rámu pouze v místě, kde je oslaben výřezem. Dále jsou ve finální konstrukci rozšířena žebra kolem součásti, do které zapadají čepy. Detailní pohled na oblast v okolí čepu je na obrázku 46. Jsou zde také přidány pásy plechu (tmavě modrá v obrázku 45), které jsou navařeny k rámu a tvoří plochy, ve kterých dojde k opření dna boxu o rám. Dále zde byly přidělané otvory v žebrech a zavětrování, které umožní dotažení šroubů uchycující čepy k saním, až po usazení rámu na saně. Profily pod pásem, na který je našroubován box, jsou z důvodu většího zpevnění uzavřeny.



Obrázek 45 *Finální návrh konstrukce rámu.*



Obrázek 46 *Finální návrh konstrukce rámu – detail.*

Finální návrh boxu

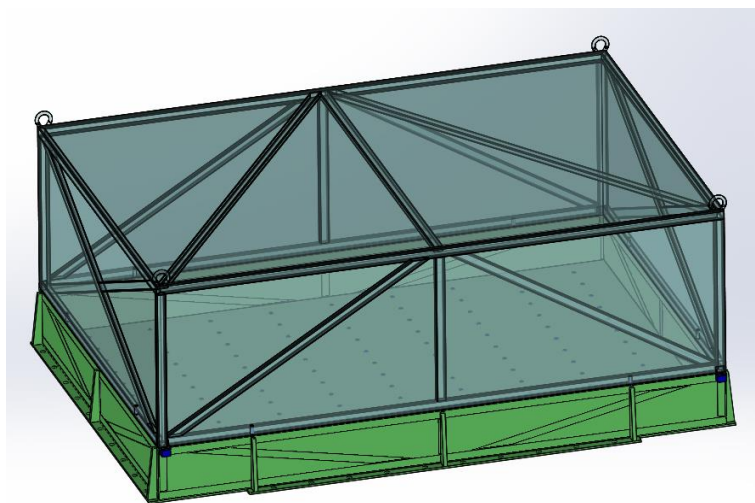
Během výpočtové fáze nedošlo ke změně rozměrů boxu ani struktury jeho stěn. Finální box má tedy rozměry 2 x 3 x 1 m. Stěny boxu jsou složeny ze tří vrstev. Vnější vrstva stěny je tvořena plechem o tloušťce 1 mm a vnitřní vrstva stěny je tvořena plechem o tloušťce 2 mm. Střední vrstva je tvořena samonosnou konstrukcí z obdélníkových profilů. V prostoru mezi profily a tenkými plechy je umístěna žáruvzdorná izolace (přesný typ nebyl zatím specifikován).

Konstrukce dna boxu se liší od ostatních stěn. Je sice také tvořena dvěma plechy, na vnější a vnitřní straně, tyto plechy jsou však silnější než plechy použité na ostatních stěnách (jejich tloušťka je 5 mm). Ve střední vrstvě je pak umístěno devět profilů, jejichž úkolem není pouze vyztužit konstrukci, ale slouží i k uchycení baterie v boxu. V každém z profilů na dně boxu je uvnitř navařen pás plechu o tloušťce 12 mm, jak je vidět na obrázku 48 a na obrázku 49. V profilech jsou pak vyvrtány závitové díry, které procházejí skrz vnitřní plech, stěnu profilu a pás plechu. Díky profilům s pásy plechu, ve kterých jsou vyvrtány závitové díry, je tak na dně boxu vytvořen závitový rastr pro upevnění baterií různých rozměrů.

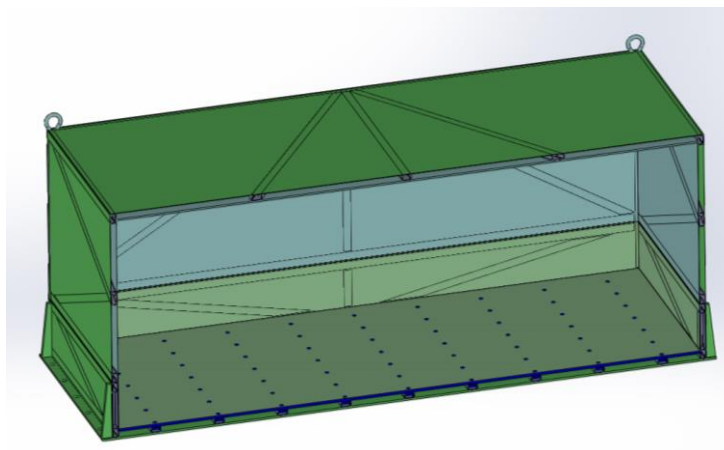
Box se skládá ze dvou částí, spodní část je vysoká 300 mm a horní část (víko) je vysoká 700 mm. Nízké boční stěny spodní části byly zvoleny s ohledem na snadnou manipulaci a upevňování baterií v boxu.

Během návrhu byla zvažována i taková varianta spodní části boxu, která by neměla boční stěny žádné, takže by byla tvořena jen dnem. Vzhledem k tomu, že při testu může dojít k porušení baterie nebo jejího chlazení a uniklé tekutiny je třeba zachytit, byla však tato varianta zamítnuta.

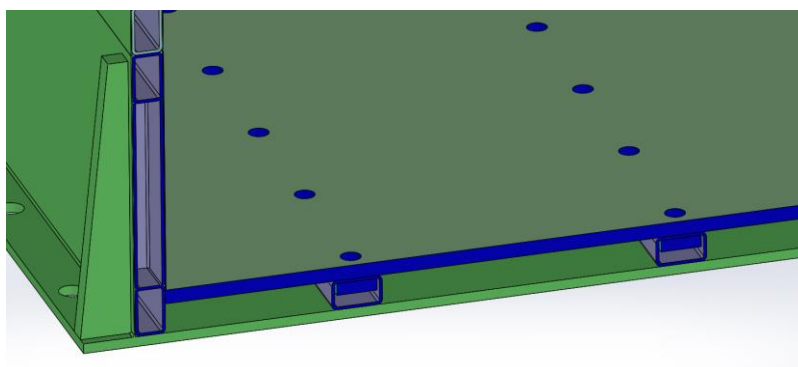
Horní část boxu je na spodní části boxu uchycena pomocí osmi čepů, čtyř upínacích spon a čtyř jisticích šroubů M16 umístěných v rozích boxu. Spodní část boxu je pak přišroubována k rámu pomocí dvaceti šroubů M24.



Obrázek 47 *Finální návrh konstrukce boxu.*



Obrázek 48 Finální návrh konstrukce boxu – řez.



Obrázek 49 Finální návrh konstrukce boxu – řez, detail.

7.9 Měřicí elektronika

Během testování EV baterií je nutné snímat zrychlení, aby bylo možné vyhodnotit správnost průběhu testu dle normy EHK 100. Zrychlení bude snímáno akcelerometrem, který je již v laboratoři nainstalován a je běžně používán při nárazových testech automobilů.

Dále je nutné sledovat data z BMS (proud, napětí a teplotu) pro včasnou detekci vzniklé závady na baterii. Navíc je možné sledovat ještě další veličiny pro zvýšení bezpečnosti osob, které test provádějí a po testu se pohybují v blízkosti baterie.

Po dokončení testu se dle EHK 100 vyhodnocuje změna izolačního odporu naměřeného na EV baterii před a po provedení testu.

7.9.1 Hlídač izolačního stavu

Hlídní izolačního stavu je příkladem měření, které by během testu sice nemuselo probíhat, slouží však k zvýšení ochrany pracovníků laboratoře pohybujících se v blízkosti baterie.

Hlídač izolačního stavu dokáže detekovat porušení vnějšího izolačního krytu baterie a ihned na tento stav upozornit.

Ze současně nabízených hlídačů izolačního stavu na trhu byl vybrán hlídač izolačního stavu od firmy BENDER, konkrétně ISOMETER IR155-3203/IR155-3204, který je určen pro DC sítě v elektromobilech.

Tento hlídač izolačního stavu je schopen monitorovat izolační stav v sítích se jmenovitou hodnotou napětí 0 až 1000 V. Nepřetržitě měří izolační odpor v rozsahu 0 až 10 MΩ. Pokud dojde k poruše, reaguje na ni do 2 s. Tento hlídač byl firmou BENDER testován i na mechanický náraz. Odolává zrychlení až 43 g, takže je pro naši aplikaci, kde je dosahováno maximálního zrychlení 28 g, naprosto dostačující.

Hlídač izolačního stavu je připojen mezi vodiče fáze a kostru. V případě, že dojde k porušení izolace, je měřicí obvod mezi fází a kostrou uzavřen a hlídačem izolačního stavu protéká proud, který je úměrný velikosti poruchy izolace. Procházející proud způsobí odpovídající pokles napětí na měřicím odporu hlídače izolačního stavu. Tento pokles napětí je vyhodnocen řídicí elektronikou hlídače izolačního stavu. Pokud pokles napětí překročí specifikovanou ekvivalentní hodnotu izolačního odporu, která byla požadována, je řídicí elektronikou odeslán signál, který na tuto skutečnost upozorňuje [29].

7.9.2 Teplotní čidla

Teplota vnějšího krytu baterie bude měřena pomocí odporového snímače Pt100. Odporové snímače využívají toho, že odpor kovů při vzrůstající teplotě roste. Tato závislost je lineární. Odporové snímače jsou časově i chemicky stabilní a dobře reprodukovatelné při výrobě.

Pro naše testování byl konkrétně vybrán snímač Pt100 od firmy HuDe, který měří teplotu v rozsahu -50 °C až 110 °C. Baterie se sice při porušení může zahřát na vyšší teplotu než 110 °C, pro rozhodnutí o zahájení chlazení baterie je však klíčové pozorovat nárůst teploty od 20 °C do 80 °C.

7.9.3 Data logger

V data loggeru dochází k vyhodnocení a ukládání dat z BMS baterie, hlídače izolačního stavu a teplotních čidel umístěných na baterii. V ideálním případě by měl data logger umožňovat i okamžitý bezdrátový přenos vyhodnocených dat do stolního počítače umístěného mimo zkušební laboratoř.

Ze široké nabídky nejrůznějších data loggerů byl nakonec vybrán data logger ALMEMO 202 od firmy AHLBORN. K tomuto data loggeru je možné připojit snímače teploty, tlaku i elektrických veličin. Výstupem BMS je CAN bus sběrnice, kterou bohužel nelze do data

loggeru přímo připojit. Můžeme však využít převodník ze sběrnice CAN bus na ethernet a po té BMS k data loggeru připojit. Ethernetový výstup už totiž data logger má [30].

Vnitřní paměť data loggeru je schopna uchovat pouze 99 hodnot, do data loggeru však lze vložit externí micro SD kartu o velikosti 512 MB, na kterou je možné uložit až 30 milionů hodnot.

Přenos měřených dat z data loggeru do počítače musí být bezdrátový, protože po dokončení testu je nutné baterii rychle odvést z prostor laboratoře a jakékoliv odpojování elektrického propojení by tento proces zpomalovalo. Navíc je nutné stav baterie snímat i po jejím odvezení z prostor laboratoře. Bohužel umožňuje samotný data logger bezdrátový přenos dat pouze přes bluetooth. Tento způsob přenosu však nemůžeme využít, protože, jak již bylo zmíněno, bude stav baterie nutné snímat i po testu, kdy bude baterie přemístěna mimo budovu, tedy do poměrně velké vzdálenosti od počítače, na kterém by měly být aktuální hodnoty měřených veličin zobrazovány. K data loggeru ALMEMO lze však připojit Wi-Fi modul, ten umožní okamžitý přenos naměřených dat na větší vzdálenost. Přenos naměřených dat přes Wi-Fi je navíc dle expertů stabilnější než přenos dat přes bluetooth [30][31].

Data loggery od firmy AHLBORN nejsou bohužel testovány na mechanický náraz. Proto budou muset být při provádění našeho testu umístěny v ochranných krabičkách vyplněných pěnou. Zda bude takováto ochrana data loggeru dostatečná, není zatím jasné. Data loggery bude tedy nutno před prvním reálným použitím několikrát otestovat.

7.9.4 Měřič izolačního odporu

Znalost izolačního odporu baterie před zahájením testování a po jeho ukončení a srovnání těchto dvou odporů nám umožňuje určit, zda uvnitř baterie došlo během testování k poškození či nikoliv. Norma EHK 100 uvádí dva možné způsoby měření izolačního odporu: měření pomocí napětí z vnějších zdrojů nebo měření pomocí zkoušeného zařízení, které je použito jako zdroj stejnosměrného napětí.

Pro naše účely byl vybrán první z uvedených způsobů měření izolačního odporu. Při tomto způsobu měření izolačního odporu musí být použit přístroj, který je schopný generovat stejnosměrné napětí, které je vyšší než jmenovité napětí měřeného zařízení. Přístroj pro měření izolačního odporu se připojí mezi živé části a kostru, po té je změřen izolační odpor.

Pro měření byl vybrán měřič izolačního odporu od výrobce ILLKO s. r. o. konkrétně IL 1700 – GIGATESTpro, který je schopen měřit izolační odpory napětím od 50 do 1000 V. Tento rozsah měřicího napětí je pro náš účel dostačující, protože napětí baterií do EV se pohybuje mezi 600 V až 800 V. Při našem rozsahu napětí je měřič schopen určit izolační odpor v rozmezí 0,1 M Ω až 9,999 G Ω . Měřič je určen jak pro měření přístrojů se stejnosměrným napětím tak se střídavým napětím [32].

ZÁVĚR

Při vývoji elektrických vozidel je kladen velký důraz na bezpečnost baterií, které se v nich používají, proto je do baterií integrováno velké množství pasivních i aktivních bezpečnostních prvků, které sice zlepšují bezpečnost, ale zároveň zvyšují jejich hmotnost a rozměry.

Současná snaha o vyvinutí baterií s vyšší hustotou energie a možností rychlého nabíjení při zachování maximální bezpečnosti vede ke zvýšení poptávky po testování baterií. Při testování jsou baterie vystavovány takovým podmínkám, ve kterých se mohou při reálném provozu elektrických vozidel vyskytnout. V současné době se baterie nejčastěji testují na vibrace, tepelný šok cyklováním, mechanický náraz, mechanickou celistvost, odolnost proti ohni, vnější ochranu proti zkratu, ochranu před přebíjením, ochranu před nadměrným vybitím a ochranu před přehřátím. Průběhy těchto testů se však dle jednotlivých norem mohou mírně lišit. Navíc jsou neustále pozměňovány tak, aby maximálně reflektovaly skutečné podmínky, kterým může být baterie vystavena.

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout mechanismus pro upnutí baterie na saně při testování na mechanický náraz dle normy EHK 100. Původně měl být tento mechanismus plně automatický, případně dálkově ovladatelný a měly v něm být užity pneumatické prvky. Avšak vzhledem k vysokým bezpečnostním nárokům při testování baterie na mechanický náraz bylo nakonec od automatického řešení ustoupeno a bylo navrženo čistě mechanické řešení. Čistě mechanické řešení maximálně snižuje riziko předčasného uvolnění baterie ze saní v průběhu pulzu i selhání mechanismu při uvolňování baterie po dokončení testu.

Bylo tedy navrženo několik řešení pro upevnění baterie k saním, tři nejlepší byla vymodelována. Z těchto tří řešení bylo nakonec vybráno jedno finální řešení, které bylo kombinací předchozích řešení. Zohledňovalo nejen rozložení závitových děr na saních v laboratoři DYCOT, kde budou testy probíhat, ale i požadavek na testování baterií na mechanický náraz ve dvou na sebe kolmých směrech, aniž by se musela mezi dvěma zkouškami měnit poloha baterie uvnitř boxu.

Finální řešení se skládá ze dvou částí: z rámu a boxu. Baterie je umístěna v boxu, který je pevně připevněn k rámu. Rám je navržen tak, aby mohl být v průběhu testu pevně přichycen k saním, ale po jeho dokončení snadno a rychle odjištěn pomocí vidlí vysokozdvížného vozíku. Konstrukce tohoto řešení byla detailně propracována a následně byly provedeny výpočty ověřující její pevnost. Na základě pevnostních výpočtů byla konstrukce ještě upravena tak, aby v žádném jejím místě nedocházelo k překročení meze kluzu oceli S355, ze které je celý box i rám navržen.

8. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] S. O. Malley and M. Paine, “Crashworthiness testing of electric and hybrid vehicles,” *24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, str. 1–16, 2015.
- [2] *UN/ECE-R100.02:2013*, Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train, UNITED NATIONS, str.1–82, 2013.
- [3] V. Ruiz, A. Pfrang, A. Kriston, N. Omar, P. Van Den Bossche, and L. Boon-Brett, “A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, str. 1427–1452, 2018.
- [4] D. Stephens, P. Shawcross, T. Stout, E. Sullivan, J. Saunders, S. Risser, and J. Sayre, “Lithium-ion Battery Safety Issues for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles,” Washington, DC, United States: National Highway Traffic Safety Administration, str. 1–261, 2017.
- [5] D. H. Doughty and A. A. Pesaran, “Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance,” Denerver West Parkway, United States: National Renewable Energy Laboratory, str. 1–115, 2012.
- [6] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, “A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, str. 834–854, 2017.
- [7] S. David and G. Per, “High-Risk E-Vehicle Battery Sled Testing, nhtsa.gov.” [Online]. Dostupné z: <https://www-esv.nhtsa.dot.gov/Proceedings/24/files/24ESV-000248.PDF>. [Zobrazeno: 09-květen-2019].
- [8] A. M. Colclasure and R. J. Kee, “Thermodynamically consistent modeling of elementary electrochemistry in lithium-ion batteries,” *Electrochimica Acta*, vol. 55, no. 28, str. 8960–8973, 2010.
- [9] G. Zhu, Y. Du, Y. Wang, A. Yu, and Y. Xia, “Electrochemical profile of lithium titanate / hard carbon composite as anode material for Li-ion batteries,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 688, str. 86–92, 2013.
- [10] L. Hollmotz, “Safety of Lithium ion batteries in vehicles - state of the art, risks and trends,” *23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, str. 1–8, 2013.
- [11] C. L. Campion, W. Li, and B. L. Lucht, “Thermal Decomposition of LiPF₆ -Based Electrolytes for Lithium-Ion Batteries,” *Journal of the electrochemical society*, vol. 152, str. 2327–2334, 2005.

- [12] H. Yang, S. Amiruddin, J. H. Bang, Y.-K. Sun, and J. Prakash, "A Review of Li-Ion Cell Chemistries and their Potential use in Hybrid Electric Vehicles," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 12, str. 12–38, 2006.
- [13] M. Wisch, J. Ott, R. Thomson, Y. Léost, M. Abert, and J. Yao, "Recommendations and Guidelines for Battery Crash Safety and Post-Crash Safe Handling," Göteborg, Sweden: EVERS SAFE (Everyday Safety for Electric Vehicles), str. 1–101, 2014.
- [14] F. Larsson, P. Andersson, and B. Mellander, "Lithium-Ion Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles on the Basis of Experimental Abuse Tests †," *batteries*, str. 1–13, 2016.
- [15] L. D. Mellert, U. Welte, M. Hermann, M. Kompatscher, X. Ponticq, M. Tesson, and J. Beckbissinger, "Elektromobilität und Tunnel-sicherheit – Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände," Schweizerische Eidgenossenschaft, Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen, str. 13–26, 2018.
- [16] K. W. E. Cheng, S. Member, B. P. Divakar, H. Wu, K. Ding, and H. F. Ho, "Battery-Management System (BMS) and SOC Development for Electrical Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, str. 76–88, 2011.
- [17] D. Andrea, *Battery management systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*. Norwood: Artech House Publishers, 2010, ISBN 978-1-60807-104-3.
- [18] Y. Xing, E. W. M. Ma, K. L. Tsui, and M. Pecht, "Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles," *Energies*, str. 1840–1857, 2011.
- [19] "Compare test topics and test conditions in the international battery standards with emphasis on Li-ion batteries, Batterystandards . info." [Online]. Dostupné z: <https://www.batterystandards.info/tables>. [Zobrazeno: 09-květen-2019].
- [20] A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot, G. Marlair, A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot, and G. Marlair, "Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle," Verneuil-en-Halatte, France: National Institute of Industrial Environment and Risks, str. 1–12, 2012.
- [21] D. Hill and N. Warner, "Considerations for ESS Fire Safety," Dublin, United States: DNV GL, str. 1–83, 2017.
- [22] W. Luo, S. Zhu, I. Gong, and Z. Zhou, "Research and Development of Fire Extinguishing Technology for Power Lithium Batteries," *Procedia Engineering*, vol. 211, str. 531–537, 2018.
- [23] M. Paine, D. Paine, J. Ellway, C. Newland, and S. Worden, "Safety precautions and assessments for crashes involving electric vehicles, esv.nhtsa.dot.gov." [Online]. Dostupné z: <https://www-esv.nhtsa.dot.gov/Proceedings/22/files/22ESV-000107.pdf>. [Zobrazeno: 09-květen-2019].

- [24] J. Crawley, “Probe of Chevy Volt fires closed,” *Reuters*, 2012. [Online]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/article/us-gm-volt/probe-of-chevy-volt-fires-closed-idUSTRE80J20X20120121>. [Zobrazeno: 08-únor-2019].
- [25] “plynové pružiny, eckold.cz.” [Online]. Dostupné z: <http://www.eckold.cz/produkty/tlacne-plynove-pruziny-9>. [Zobrazeno: 09-březen-2019].
- [26] “pneumatické upínače, norelem.com.” [Online]. Dostupné z: <https://www.norelem.com/cz/cs/Produkty/Přehled-výrobků/Pružný-systém-normalizovaných-dílů/05000-Rychloupínače-Pneumatické-upínače-Příslušenství-upínačů-Upínací-uzávěry-Západkové-uzávěry/Pneumatické-upínače/05340-Pneumatické-upínače-s-posuvnou-tyčí.html>. [Zobrazeno: 09-březen-2019].
- [27] “plynové vzpěry, montako.cz.” [Online]. Dostupné z: <https://www.montako.cz/vzpery-s-tvrdou-blokaci/12453-plynova-vzpera-s-blokaci-s38180.html>. [Zobrazeno: 09-březen-2019].
- [28] “zero point system, amf.de.” [Online]. Dostupné z: <https://www.amf.de/files/amf-assets/news/downloads/catalogues/Catalogue-AMF-Zero-Point-Systems.pdf>. [Zobrazeno: 09-březen-2019].
- [29] “isometer, bender.de.” [Online]. Dostupné z: <https://www.bender.de/en/know-how/technology/it-system/insulation-monitoring>. [Zobrazeno: 13-duben-2019].
- [30] “data logger, ahlborn.cz.” [Online]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/datalogger-ahlborn-almemo-202.html>. [Zobrazeno: 01-květen-2019].
- [31] “WiFi-modul.” [Online]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/prislusenstvi/prenos-dat/wifi-modul-almemo.html>. [Zobrazeno: 01-květen-2019].
- [32] “měřič izolačního odporu, illko.cz.” [Online]. Dostupné z: <https://www.illko.cz/gigatestpro-detail-produktu>. [Zobrazeno: 29-duben-2019].
- [33] “Consolidated Resolution on the Construction of Vehicles (R.E.3),” Economic and Social Council, United Nations, str. 6–8, 2017.