

Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F2**

Fakulta strojní  
Automatizační a přístrojová technika

## Návrh polo/automatického polohovacího kamerového systému pro filmování aktivací airbagů

**Bc. Petr Písařík**

Školitel: Ing. Petr Denk, Ph.D  
Leden 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Písařík** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **456753**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojn**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Automatizační a přístrojová technika**  
Specializace: **Přístrojová technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh polo/automatického polohovacího kamerového systému pro filmování aktivací Airbagu**

Název diplomové práce anglicky:

**Design of a semi / automatic positioning camera system for filming Airbag activations**

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše konstrukce a provedení airbagových systému používaných v osobních automobilech
2. Rešerše testovacích metodik airbagových systému prováděných optickými bezkontaktními metodami
3. Návrh několika variant polohovacího systému kamer pro snímání zkoušek airbagových systémů na zkušebně a výběr jedné varianty k rozpracování
4. Detailní rozpracování zvoleného konceptu

Seznam doporučené literatury:

1. Krejčí, J., 2013. Crash Tests of Vehicles-Selected Experiments and Analysis. Transactions on Transport Sciences, 6(4), p.193. ISBN 978-3-540-73872-5
2. Zhang, Z., Zou, Y., Zhang, X., Xu, Z. and Wang, H., 2020. Driver model based on optimized calculation and functional safety simulation. Energies, 13(24), p.6659. ISBN 978-0-8493-3322-4
3. Schmitt, K.U., Niederer, P.F., Muser, M.H. and Walz, F., 2009. Trauma Biomechanics: Accidental injury in traffic and sports. Springer Science & Business Media. ISBN 978-3-540-73872-5
4. Binter, M., 2016. Specifika zásahu jednotek požární ochrany při silničních dopravních nehodách s velkým počtem postižených osob (Bachelor's thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.). ISBN 80-86640-74-4

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Petr Denk, Ph.D., odbor přesné mechaniky a optiky FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **29.10.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **20.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Petr Denk, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Denkovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat všem, kteří mě podporovali při studiu a psaní diplomové práce.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

.....

V Praze, 15. ledna 2022



## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem polo/automatického polohovacího systému pro filmování aktivací airbagů. Automatizací současného procesu manuálního nastavování kamer, dojde ke zvýšení kvality a produktivity airbagových aktivčních zkoušek. Teoretické části práce jsou zaměřeny na airbagové systémy, používané v osobních automobilech, jejich konstrukci a druhy. Dále je objasněna legislativa a způsob testování airbagových modulů. V praktické části jsou v airbagové zkušebně TUV SÚD stanoveny technické požadavky na polohovací kamerový systém. Pro airbagovou zkušebnu jsou zpracovány a následně představeny různé návrhy polohovacího kamerového systému. Vytvořené návrhy jsou vyhodnoceny a je zvolen nejvhodnější. Vybraný návrh tvoří soustava pevně umístěných základů, kde na každé takové základně je umístěna polohovací platforma pro jednu snímací kameru. Pohybem platformy je nastavována poloha a úhel kamer. Tento návrh je následně detailněji zpracován a je stanovena mechanická konstrukce systému.

**Klíčová slova:** Airbag, aktivční airbagové zkoušky, polohovací kamerový systém, lineární modul

**Školitel:** Ing. Petr Denk, Ph.D

## Abstract

This Diploma Thesis deals with the design of a semi / automatic positioning camera system for filming airbag activations. By automating the current process of manually adjusting the cameras, the quality and productivity of airbag activation tests will increase. The theoretical parts of the Thesis are focused on airbag systems used in passenger cars, their construction and types. Furthermore, the standards and the methods testing of airbag modules are clarified. In the practical part, the technical requirements for the positioning camera system are set in the TUV SÚD airbag test room. Various designs of the positioning camera system are processed and presented for the airbag test room. The created proposals are evaluated and the most suitable one is chosen. The selected design includes of a set of fixed bases, where positioning platform for one scanning camera is placed on each such base. The position and angle of the cameras are set by moving the platforms. This design is then elaborated in more detail and the mechanical construction of the system is determined.

**Keywords:** Airbag, airbag activation tests, positioning camera system, linear modul

**Title translation:** Design of a semi / automatic positioning camera system for filming airbag activations

# Obsah

<b>1 Úvod do problematiky</b>	<b>1</b>	5.1.2 Čas dosažení pozic	46
<b>2 Airbag</b>	<b>3</b>	5.1.3 Rozsah pohybu	46
2.1 Biomechanická kritéria poranění	3	5.1.4 Provozní omezení systému	48
2.1.1 Kritéria poranění hlavy	4	5.2 Návrhy systému	50
2.1.2 Kritérium poranění krku	4	5.2.1 Návrh 1	52
2.2 Funkce airbagů	6	5.2.2 Návrh 2	57
2.3 Historie airbagů	6	5.2.3 Návrh 3	60
2.4 Druhy airbagů	9	5.2.4 Návrh 4	63
2.4.1 Čelní airbagy	9	5.2.5 Návrh 5	66
2.4.2 Boční airbagy	10	5.2.6 Návrh 6	68
2.4.3 Speciální airbagy	12	5.2.7 Návrh 7	71
2.5 Průběh aktivace airbagů	13	5.3 Vyhodnocení návrhů	72
2.6 Konstrukce airbagů	15	5.3.1 Výběr návrhu	74
2.6.1 Airbagové vaky	15	<b>6 Konstrukce kamerového</b>	
2.6.2 Zdroje plynu	16	<b>polohovacího systému dle návrhu 7</b>	<b>76</b>
2.6.3 Řídící jednotka	19	6.1 Uložení efektoru a jeho rotace	76
2.6.4 Senzory zrychlení	20	6.1.1 Nosič kamery	78
<b>3 Legislativa a normy airbagů</b>	<b>21</b>	6.1.2 Rotační manipulátory úhlů $\alpha$ a $\beta$	79
3.1 Evropská legislativa	21	6.2 Lineární moduly	84
3.2 EKH č.114	23	6.2.1 Lineární modul osy $Z$	85
3.3 Kontrola požadavků stanovených předpisy EHK a normami	24	6.2.2 Lineární modul osy $Y$	87
<b>4 Dynamické a statické zkoušky airbagů</b>	<b>26</b>	6.2.3 Lineární modul osy $X$	89
4.1 Nárazové zkoušky	26	6.3 Statická platforma	90
4.1.1 Čelní náraz do deformovatelné bariéry	27	6.3.1 Pohyb jednotky	92
4.1.2 Čelní náraz do nedeformovatelné bariéry s plným překrytím	28	6.3.2 Pozicování platform ve zkušebně	97
4.1.3 Boční náraz do sloupu	29	6.4 Výsledný systém	100
4.1.4 Boční náraz pohyblivou deformovatelnou bariérou	29	<b>7 Závěr</b>	<b>101</b>
4.1.5 Zadní náraz do stojícího vozidla	30	Odkazy	103
4.1.6 Náraz vozidla do chodce	31	<b>Seznam zdrojů</b>	<b>106</b>
4.2 Statické testování airbagů	32		
4.2.1 Zkoušky environmentální odolnosti	32		
4.2.2 Aktivační zkoušky	39		
<b>5 Návrh systému zefektivňující airbagové aktivační zkoušky</b>	<b>43</b>		
5.1 Technické požadavky a vlastnosti systému	44		
5.1.1 Opakovatelnost	44		

## Obrázky

2.1 První graf zobrazuje maximální "bezpečný čas", po který mohou jednotlivé tahové síly působit na oblast krku. V druhém grafu jsou tahové síly nahrazeny smykovou silou. [4] .....	5
2.2 Tahové a smykové síly působící na oblast krku. [5] .....	6
2.3 Airbagový test Mercedes-Benz provedený v roce 1981 v Amsterdamu.[8] .....	8
2.4 Značka čelního airbagu spolujezdce ve voze Audi A3 Sportback 1.9 TDI[10].....	9
2.5 Čelní airbag řidiče a spolujezdce[11] .....	10
2.6 Rozvinutý kolenní airbag řidiče ve vozidle BMW[11] .....	10
2.7 Test hlavového a bočního airbagu při převrácení vozidla. Z fotografií je vidět, že airbagové vaky zůstávají nafouknuté. Vaky zůstávají nafouklé řádově desítky sekund. [11].....	11
2.8 Test bočního nárazu bez airbagů obrázek vlevo vs vozidlo s bočním a hlavovým airbagem. [11] .....	11
2.9 Airbagy v zadních bezpečnostních pásech ve voze Ford Explorer. [13]	12
2.10 Airbagy pro chodce umístěný ve voze Volvo V40. [14].....	13
2.11 Příklad možného rozložení airbagů a senzorů ve vozidle. Octavia III. Zelenou barvou jsou označeny senzorické a řídicí jednotka. Modře navíječe pásů a červeně moduly airbagů.[15] .....	14
2.12 Obečná časová osa čelního střetu vozidla Aktivace čelních airbagů.[15]	15
2.13 Chemická struktura Polyamidu 6,6[16].....	16
2.14 Generátor plynu s pevnou hnací látkou před a během aktivace.[17] .	17
2.15 Hybridní generátor plynu. Uvnitř tlakové nádoby je odpálena aktivační pyrotechnika otvírající cestu do vaků.[17].....	18
2.16 Řídicí jednotka napojená na senzory a bezpečnostní prvky jako jsou airbagy[18].....	19
2.17 Jednoosá MEMS struktura používaná jako senzor akcelerace. [20] .....	20
3.1 Airbagový systém a jeho jednotlivé součásti[26] .....	23
4.1 Figurína <i>THOR-50 M</i> používaná při testech čelního nárazu, umožňující přesné stanovení biomechanických rizik poranění. [28]	27
4.2 Grafické znázornění čelního nárazu do deformovatelné bariéry v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP [29].....	27
4.3 Grafické znázornění čelního nárazu do nedeformovatelné bariéry v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP [29].....	28
4.4 Grafické znázornění bočního nárazu do úzké tuhé bariéry v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP [29].....	29
4.5 Grafické znázornění bočního nárazu deformovatelné bariéry do vozu v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP [29] .....	30
4.6 Grafické znázornění nárazu do zadní části vozu v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP [29]. .....	31
4.7 Grafické znázornění srážky vozidla s chodcem v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP testující horní část nohou[29]. .....	32
4.8 Půl sinusový pulz [30].....	34
4.9 Komora pro prachový test, rozměry jsou uvedené v <i>mm</i> [30]. .....	35
4.10 Rozsah vibračních aplikovaných na moduly airbagů[30]. .....	36
4.11 Teplotní harmonogram v průběhu vibračních zkoušky [30]. .....	36
4.12 Teplotní harmonogram v průběhu vlhkostní zkoušky s úrovněmi relativní vlhkosti [30]. .....	37

4.13 Suchý klimatický cyklus testu solárního záření [30]. . . . .	38	5.18 Robotická ramena na závěsném vedení . . . . .	65
4.14 Cyklus zkoušky šokové teplotní změny[30]. . . . .	39	5.19 Robotická ramena <i>Ewellix</i> umístěná na zvedajícím členu, který rozšiřuje dosah ramene.[35] . . . . .	66
5.1 Snímek po zkoušce, kde je vidět část kostry vozu s interiérem osazeným airbagovým modulem. Dále jsou v popředí vidět vysokorychlostní kamery ručně nastavené do pozic pomocí stativů[31]. . . . .	43	5.20 Schéma zkušebny s názorným umístěním polohovacích jednotek . . . . .	67
5.2 Osy pohybu kamer. . . . .	44	5.21 Věž s vertikálním lineárním pojezdem a robotickou rukou[36]. . . . .	68
5.3 Schéma ukázkové situace posunutí obrazu vlivem posuvu kamery . . . . .	45	5.22 Ukázka pohyblivé věže s robotickým ramenem [37]. . . . .	69
5.4 Schéma laboratoře pro aktivační zkoušky airbagů. . . . .	47	5.23 Možnosti pohybu všesměrového kola [38]. . . . .	69
5.5 Ukázka portálového jeřábu, jehož komponenty by bylo možné použít při konstrukci polohovacího systému [32]. . . . .	52	5.24 Měření odchylek polohy na přímé dráze v závislosti na ujeté vzdálenosti [39]. . . . .	70
5.6 Dvouosé lineární vedení HUDE. . . . .	53	5.25 Tříosý lineární polohovací systém umístěný na podlaze zkušebny. . . . .	71
5.7 Návrh konstrukce pomocí jeřábového řešení. S dvojicí Z posuvů na jedné příčnici. . . . .	54	5.26 Příklad manuálně ovládaného víceosého rotačního systému [40]. . . . .	72
5.8 Návrh podoby systému před komorou. . . . .	56	6.1 Rozměry vysokorychlostní kamery FASTCAM Mini AX200 . . . . .	77
5.9 Návrh podoby systému vedle komory. . . . .	57	6.2 Kamerové lože s čepem pro podepření. . . . .	78
5.10 Návrh dopravníkového vedení kolem obou oblastí. . . . .	58	6.3 Síly působící na rotační manipulátor RM-3 [40]. . . . .	79
5.11 Návrh dopravníkového vedení kolem oblasti před komorou. . . . .	59	6.4 Rozměry rotační platformy RM-3 s krokovým motorem [40]. . . . .	80
5.12 Nelineární hřeben umožňující přesný pohyb vozíků po vedení[33] . . . . .	59	6.5 Vysokorychlostní kamera je umístěná v loži s rotačním uložením. Maximální úhly natočení $\alpha$ jsou vyznačené. Rotační pohyb je omezen kabely motorů, kamery a objektivem. . . . .	81
5.13 Rameno manipulátoru a posuvem vhodným pro přesné polohování kamer FLT [34]. . . . .	61	6.6 Vysokorychlostní kamera umístěná na rotátoru nastavující úhel $\beta$ . Omezení rotace je definováno délkou kabelů kamery a motorů na jednu stranu rozsah $50^\circ$ a na druhou $75^\circ$ . . . . .	81
5.14 Pozemní vedení [34]. . . . .	61	6.7 Podoba navrženého efektoru kamery. . . . .	82
5.15 Možná podoba tříosého polohovacího systému v případě, kdy by došlo k posunutí ventilace a osvětlení. . . . .	62	6.8 Schéma pro výpočet průhybu nosiče efektoru . . . . .	82
5.16 Rozměry nosníků HAE100 [33] . . . . .	62	6.9 Analýza součástky spojující efektor s lineárním vedením . . . . .	83
5.17 Ukázka robotického ramene Od <i>EWELLIX</i> umístěného na lineárním vedení, které zvětšuje dosah ramene [35] . . . . .	64		

6.10 Schéma vzniku momentového zatížení $M_a$ vzniklého hmotností efektoru. ....	86
6.11 Lineární modul osy $Z$ se znázorněným silovým namáháním [42]. ....	87
6.12 Schéma spojení lineárních modulů pomocí spojovací hřídele. ....	90
6.13 Hliníkové profily statické platformy [43]. ....	91
6.14 Model platformy, na kterou bude uložen systém lineárních modulů. .	92
6.15 Kolo zajišťující hladký posuv polohovací jednotky[44]. ....	93
6.16 Podoba konstrukčního návrhu polohovací jednotky pro vysokorychlostní kamery. ....	94
6.17 Podoba konstrukčního návrhu polohovací jednotky pro vysokorychlostní kamery, čelní pohled. ....	95
6.18 Podoba konstrukčního návrhu polohovací jednotky pro vysokorychlostní kamery, boční pohled. ....	96
6.19 Podoba konstrukčního návrhu polohovací jednotky pro vysokorychlostní kamery, horní pohled. ....	97
6.20 Příklad uložení polohovacích jednotek v prostoru před klimatickou komorou. ....	99
6.21 Příklad uložení polohovacích jednotek v prostoru vedle klimatické komory a v prostoru před. Ukazující snadnou změnu polohy polohovacích jednotek. ....	100

## Tabulky

4.1 Harmonogram enviromentálních zkoušek zatížení airbagových modulů.[30] .....	33
4.2 Spektrální rozdělení simulovaného záření. Pro získání těchto hodnot byly použity metalický halogen.[30]	38
4.3 Cyklus solární zkoušky .....	39
4.4 Program aktivačních zkoušek airbagových modulů zatížených a nezatížených enviromentálními procesy[30]. ....	41
5.1 Hodnocení návrhu s jeřábovými komponentami .....	57
5.2 Hodnocení návrhu s podvěsnými dopravníky .....	60
5.3 Hodnocení návrhu s manipulátory	63
5.4 Hodnocení návrhu s robotickými rameny na lineárním vedení .....	66
5.5 Hodnocení návrhu s robotickými rameny na statických platformách	68
5.6 Hodnocení návrhu s robotickými rameny na mobilních platformách .	70
5.7 Hodnocení návrhu s lineárními posuvy na statických platformách .	72
5.8 Celkové umístění jednotlivých návrhů vypovídající o vhodnosti užití .....	73
5.9 Přehled bodových zisků jednotlivých návrhů .....	73
6.1 Maximální přípustné silové namáhání lineárního modulu osy v horizontální poloze [42] $Z$ .....	87
6.2 Maximální přípustné silové namáhání lineárního modulu osy $Y$	89

# Kapitola 1

## Úvod do problematiky

Provoz na silnicích se postupně každým rokem navyšuje. S rostoucím provozem bohužel roste i počet dopravních nehod, při nichž dochází ke zranění nebo usmrcení. Pro lepší představu následuje přehled množství nehod a úmrtí, který zahrnuje i střety osob chráněnými bezpečnostními prvky vozidla s nechráněnými chodci, či zvěří a další. Dle ČSÚ v České republice vzrostl počet dopravních nehod za posledních deset let z 74,8 tisíc (v roce 2009) na 107,5 tisíc (v roce 2019). Počet usmrcených osob však klesá. V roce 2009 zemřelo v důsledku dopravních nehod 901 osob, v roce 2019 byl tento počet snížen na 618.[1]

Na poklesu počtu osob, usmrcených během dopravních nehod, se velkou mírou podílí přirozené omlazování vozového parku. Během deseti let došlo k zlepšení konstrukce silničních vozidel. Dokonalejší konstrukce zahrnuje i rozšíření a zdokonalení bezpečnostní výbavy vozidel. Modernější vozidla jsou vybavována dokonalejšími bezpečnostními prvky, například počet vozidel vybavených airbagovými systémy v provozu se zvýšil. Bezpečnostní prvky vozidel rozdělujeme do dvou kategorií, a to na aktivní a pasivní prvky. Aktivní bezpečnostní prvky předcházejí vzniku dopravních nehod. Pasivní bezpečnostní prvky minimalizují škody během samotného střetu a po něm.

Airbagy se za posledních několik dekad staly běžnou součástí dopravních prostředků. Silniční vozidla jsou již standardně vybavována bezpečnostními airbagy různých druhů. V některých státech, například v USA, jsou airbagy v nově vyráběných vozech povinné. Airbagové zádržné systémy snižují zranění a škody vzniklé během střetů. Kvůli rozšířenosti automobilů musí i airbagové systémy být konstruovány tak, aby plnili svou funkci v různých podmínkách. Různými podmínkami jsou myšleny velké teplotní a vlhkostní rozdíly. Airbagy musí správně fungovat na suchých pouštích, kde teplota může běžně dosahovat 80 °C, v přímořských oblastech s vysokou vlhkostí, ale i v chladných arktických oblastech v -40 °C.

Správnou funkci airbagů definují příslušné normy. Nově vyvíjené airbagové systémy i již sériově vyráběné jsou průběžně podrobovány zkouškám, které určují, zdali vyrobené airbagy splňují předepsané normy. Obdobně jako jsou definovány airbagové normy, tak jsou definovány i airbagové zkoušky. Zkoušky





## Kapitola 2

### Airbag

Airbagové systémy jsou součástí bezpečnostních systémů v dopravních prostředcích. Airbagové systémy se řadí do prvků pasivní bezpečnosti společně s bezpečnostní pásy, opěrkami hlavy, bezpečnostním rámem a dalšími prvky. Prvky pasivní bezpečnosti slouží k minimalizování následků na zdraví cestujících v průběhu střetu, nikoliv k snížení materiálních škod. K předcházení střetu jsou určeny prvky aktivní bezpečnosti například ABS (Anti-lock Braking Systems) atd. Tato práce se výhradně zabývá bezpečnostními airbagovými systémy.

Airbagy řadíme do kategorie zádržných systémů a jsou pouze doplňkovou ochranou. Ve vozidlech jsou umístěné různé druhy airbagů, které jsou konstruovány tak, aby cíleně chránily konkrétní části těl cestujících během dopravních nehod. Airbagové systémy jsou navrženy tak, aby společně s bezpečnostními pásy a dalšími bezpečnostními prvky chránily cestující vozidla před přímým střetem s interiérem vozidla. Zabraňují tělu nekontrolovaně putovat v interiéru vozidla a tím cíleně chrání příslušné části těla cestujících, jakými jsou například hlava, krk, nohy atd.

### 2.1 Biomechanická kritéria poranění

Lidské tělo není stavěno na působení velikého přetížení, jakému je vystaveno v průběhu dopravních nehod. Závažnost určitých situací, a tedy i rozsah poranění můžeme hodnotit podle biomechanických kritérií, nebo dle stupnice AIS (Abbreviated Injury Scale). Z vypočítaných hodnot lze tedy odvodit jaká poranění hrozí v různých počátečních podmínkách. Posouzení reálných nehod, testů, nebo matematických simulací se obvykle hodnotí podle kritérií, založených na základě pravděpodobnostní analýzy závažnosti poranění sledované části lidského těla. Ty korelují se zatížením, kterému je určitý biologický subsystém vystaven. Globální pohled poskytuje hodnocení podle AIS. Tato metodika vyjadřuje závažnost poranění na stupnici hodnot od 0 do 6, neznámé případy jsou klasifikovány stupněm 9.[2] V následující části budou ukázány některá z kritérií sloužící k určení závažnosti poranění hlavy a krku v definovaných podmínkách.



### ■ 2.1.1 Kritéria poranění hlavy

Hlava je jednou z nejnáchylnějších částí těla z hlediska četnosti a závažnosti poranění během dopravních nehod. Využívané kritérium podle kterého se určuje poranění hlavy je *HPC* (Head Performance Criterion). *HPC* kritérium se využívá hlavně při nárazových destrukčních zkouškách. Během zkoušek jsou ve vozidlech figuríny. Tyto zkušební figuríny jsou osazené akcelerometry a jeden z nich je umístěn i v těžišti hlavy. Kritérium je určeno z počátečních podmínek a dat senzoru, tedy z průběhu zrychlení na daném časovém intervalu. Časový rozsah intervalu je volen podle konkrétní situace. Pokud dojde k tvrdému nárazu hlavy, například o interiér vozu, je časový interval roven 15 ms, v tomto případě označujeme kritérium jako  $HPC_{15}$ . V případech kdy nedojde k nárazu je časový interval roven 36 ms a kritérium nese označení  $HPC_{36}$ . Možnou alternativou kritéria *HPC* je *HIC* (Head Injury Criterion), hodnoty obou kritérií jsou identické.[3]

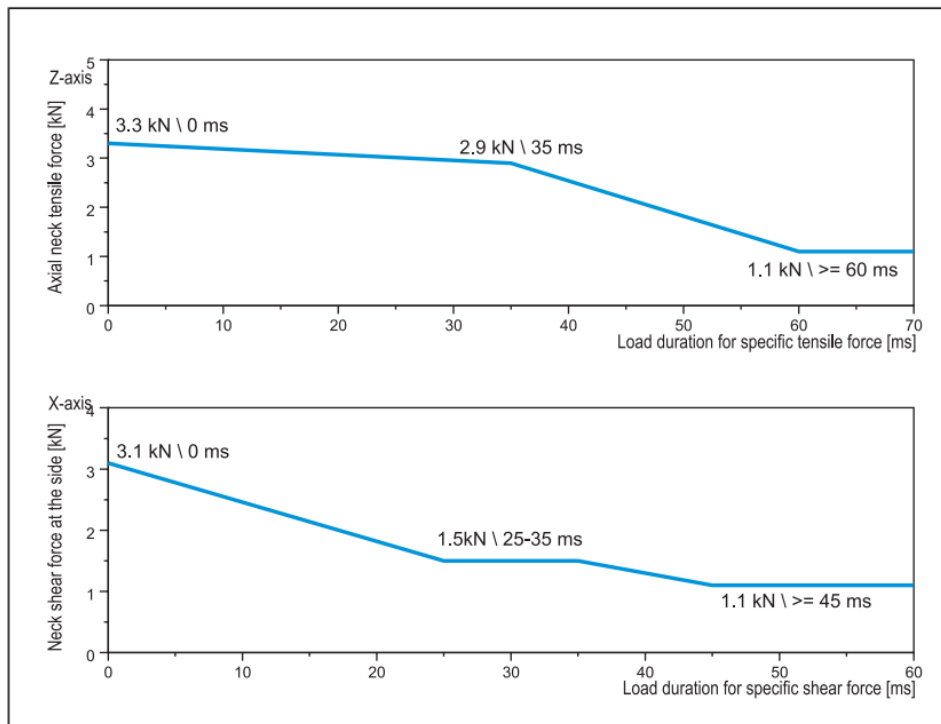
$$HPC = \left[ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_2}^{t_1} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (2.1)$$

$$a(t) = |\mathbf{a}(t)| = \sqrt{\mathbf{a}_x^2 + \mathbf{a}_y^2 + \mathbf{a}_z^2} \quad (2.2)$$

Kde hodnoty *HPC* by neměly přesáhnout hodnotu 1000, která je považovaná za limitní. V rovnici 2.1  $t_1$  a  $t_2$  označují počátek a konec sledovaného děje. Výsledná hodnota zrychlení  $a$  je vypočítána z dílčích vektorových zrychlení pomocí rovnice 2.2.

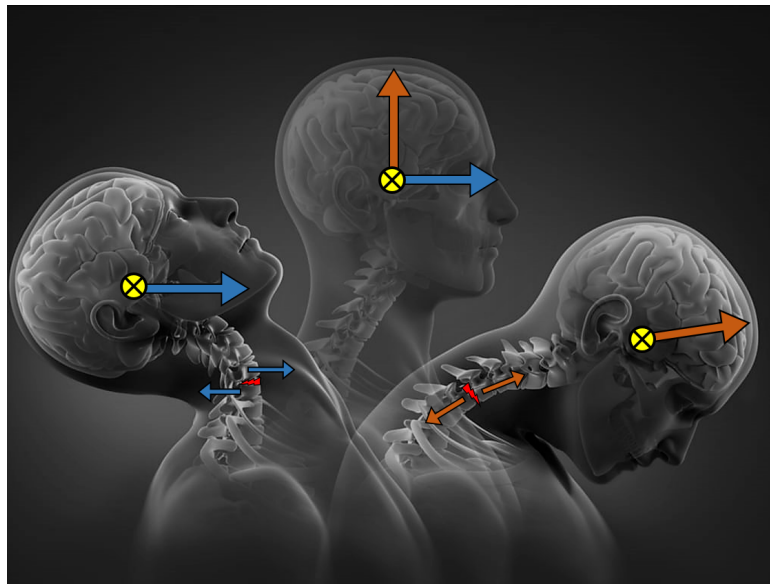
### ■ 2.1.2 Kritérium poranění krku

Úrazy hlavy jsou většinou doprovázeny i poraněním krční páteře. Modelování krční páteře je relativně novinkou a stále je předmětem vývoje. Kritérium hodnotící závažnost poranění krku používané při nárazových zkouškách EHK OSN č. 94 a 95 (Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů) se označuje *NIC* (Neck Injury Criterion). *NIC* definuje maximální hodnoty axiální tahové, tlakové síly a smykavá napětí působící na krk. Kritérium záleží jen na velikosti síly nikoliv na jejím směru.



**Obrázek 2.1:** První graf zobrazuje maximální "bezpečný čas", po který mohou jednotlivé tahové síly působit na oblast krku. V druhém grafu jsou tahové síly nahrazeny smykovou silou. [4]

Pro lepší představu je na obrázku 2.2 znázorněna síla působící na oblast krku. Tato síla vzniká při rychlé změně rychlosti hlavy, například vlivem nárazu. Sílu je možné rozdělit na sílu smykovou a tahovou (tlakovou). Obě tyto síly působí simultánně a jejich velikost se mění v závislosti na poloze těžiště hlavy vůči tělu. Oranžové šipky znázorňují tahové a tlakové síly, které působí v axiálním směru s osou krku. Tahové síly napínají krk, což vede k destruktivnímu zvětšení meziobratlových vzdáleností. Opačně působí tlakové síly, které snižují meziobratlové vzdálenosti a tím také poškozují okolní tkáň. Modré šipky znázorňují smykové zatížení oblasti krku. Smykové síly působí v radiálním směru, což způsobuje posuv jednotlivých obratlů vůči sobě.



**Obrázek 2.2:** Tahové a smykové síly působící na oblast krku. [5]

## 2.2 Funkce airbagů

Airbagové systémy společně s ostatními pasivními bezpečnostními prvky chrání cestující ve vozidlech v průběhu kolize. Jak již bylo zmíněno, airbagy patří do kategorie zádržných systémů. Airbagový systém je tvořený textilním vakem, nafukovacím modulem, senzory nárazu a řídicí jednotkou. Vyhodnotí-li řídicí jednotka nastalou situaci jako dostatečně závažnou, dochází k aktivaci příslušných airbagových okruhů. V průběhu srážky pak dochází k rychlému nafouknutí vaků pomocí nafukovacích modulů. Povrch vaku poskytuje měkké nárazové plochy, které jsou schopné pohltit kinetickou energii pohybujícího se těla. Síla nárazu těla do vaku způsobí opětovné vyfouknutí, a tak je vstřebána energie a zpomalení pohybu cestujícího. Snížením kinetických sil těla jsou sníženy hodnoty kritérií a tím i rizika vážného poranění.

## 2.3 Historie airbagů

Původní myšlenka airbagů byla jako alternativa za bezpečnostní pásy. Airbagy však v určitých situacích způsobovali vážná zranění a někdy i usmrcení pasažérů. Zkoumáním bylo odhaleno, že mnoho z těchto situací je možné eliminovat kombinací airbagů s bezpečnostními pásy. Airbagy se v průběhu let staly doplňkovou ochranou k bezpečnostním pásům. O první vzduchem plněné vaky v automobilech se zasloužil John W. Hetrick, který v roce 1952 požádal o patent airbagu. Patent byl Hetrickovi udělen o rok později v roce 1953 [6]. Jako zdroj vzduchu byl použit stlačený vzduch, což se v pozdějších dobách ukázalo jako nedostačující. Aktivace airbagů byla založena čistě na mechanickém principu (kontakt pasažéra s interiérem vozu, kontakt nárazníku

atd.). V roce 1964 v Japonsku vyvinul Yasuzaburo Kobori airbag nafukovaný pomocí výbušniny.

Průlomovým rokem pro podobu airbagů, jaké známe dnes se stal rok 1967. Allen K. Breed vynalezl elektromechanický senzor detekce nárazu. Senzor byl složen z trubice, ke které byla magnetem připevněna ocelová koule. Pomocí tohoto mechanismu a generátoru vzduchu založeném na explozi azidu sodného došlo k nafouknutí vaku airbagu do  $30\text{ ms}$  [7]. Tento senzor byl prodán firmě Chrysler.

Airbagy pro automobily byly v USA zavedeny až v polovině 70. let. Ford představil experimentální flotilu automobilů s airbagy v roce 1971, následovaný General Motors v roce 1973. Nicméně velký úspěch neměly. Vývoj airbagů se shodoval s mezinárodním zájmem o legislativu bezpečnosti automobilů. V roce 1975 Volvo představuje výhody airbagových systémů a simuluje dopravní havárii. Využívá zde 24 vepřů, které simulují nepřipoutané děti. Výsledek simulace dokazuje užitečnost airbagů.

Původní vnímání airbagů je v roce 1980 změněno firmou Mercedes-Benz. Firma představí vůz W126, kde jsou airbagy představeny jako další bezpečnostní prvek, který kombinuje nikoliv nahrazuje bezpečnostní pásy a zajišťuje tak cestujícím vyšší bezpečnost.



**Obrázek 2.3:** Airbagový test Mercedes-Benz provedený v roce 1981 v Amsterdamu.[8]

K širšímu rozšíření airbagů dochází až v roce 1988, kdy Chrysler zařazuje airbagy pro řidiče jako standardní výbavu pro domácí vozy. Chrysler začal také veřejně propagovat airbagy a ty se staly prodejní výhodou. V roce 1989 zavádí airbagy ve standardní výbavě i Ford. V roce 1992 se staly airbagy pro řidiče i spolujezdce již běžnou součástí osobních vozů. V roce 1995 jsou běžné i boční a hlavové airbagy.

V roce 1998 jsou vydána nová pravidla pro airbagy. Výrobci automobilů tak poskytla větší flexibilitu s technologickým řešením. Nová pravidla rovněž definovala ochranu cestujících různých velikostí bez ohledu na bezpečnostní pásy [9].

V roce 2000 jsou již auta po celém světě běžně vybavena airbagy ve standardní výbavě. Rozmach automobilového průmyslu jde ruku v ruce i s vývojem bezpečnostních systémů. Při porovnání vývoje pasivních a aktivních bezpečnostních prvků v 21. století, pozorujeme rychlejší trend vývoje spíše u prvků aktivní bezpečnosti. Pasivní prvky jako airbagové systémy neprocházejí tak výraznými změnami. Vývoj digitální a senzorické techniky umožňuje širší aplikaci automatických systémů, které snižují riziko vzniku dopravních nehod. Jsou to třeba adaptabilní tempomaty, asistenti jízdních pruhů, systémy automatického brzdění a další. Nové technologie umožňují i dokonalejší pasivní

prvky například: výkonnější generátory plynu, odolnější vaky atd.

## 2.4 Druhy airbagů

Místa v interiéru, ve kterých jsou umístěny airbagové systémy, jsou vždy příslušně označena. Označení může být prosté *AIRBAG* nebo specifitější označujících umístění nebo typ airbagu ve voze. Taková označení jsou například *SRP* (System for Restraint and Protection), *SRS* (Supplementary/Secondary Restrain System), *SIPS* (Side Impact Protection System) ochranný systém při bočním nárazu, *IC* (Inflatable Curtain) záclonový airbag, *PLP* (Pyrotechnical Laphbelt Pretensioner) pyrotechnický předepínač bederních pásů, *DMIC* (Door Mounted Inflatable Curtain) záclonový postranní airbag umístěný, *ROPS* (Roll Over Protection System) ochranný systém při převrácení kabrioletu atd.



**Obrázek 2.4:** Značka čelního airbagu spolujezdce ve voze Audi A3 Sportback 1.9 TDI[10]

### 2.4.1 Čelní airbasy

Čelní airbasy chrání cestující při čelním střetu. Do kategorie čelních airbagů zahrnujeme modul airbagu řidiče, modul airbagu spolujezdce a modul kolenního airbagu řidiče.

Modul airbagu řidiče je umístěn ve volantu. Je složen ze vzduchového vaku a generátoru plynu. Tvar a velikost vaku je uzpůsobena prostoru mezi volantem a řidičem, tedy aby po rozvinutí vak vyplnil tento prostor a ochránil řidiče před nárazem. Modul je uložený za plastové kryty interiéru a elektricky propojen s řídicí jednotkou airbagů. Při aktivaci dojde k nafouknutí vaku. Plyn je generován plynovým generátorem s pevnou látkou. Plastový kryt, pod kterým je airbag uložen, je vlivem rostoucího tlaku uvnitř vaku roztržen. Roztržený kryt zůstává i nadále spojen s modulem airbagu, což zabrání tomu, aby vymrštnuté kusy krytu způsobovali nežádoucí poranění. Zadní strana vaku je opatřena výfukovými ventily, které slouží k vyfouknutí vaku tlakem těla. Hlavním cílem je ochránit krční páteř, hrudník a hlavu řidiče.

Dalším airbagem chránící cestující při čelním střetu je airbag spolujezdce. Airbag spolujezdce je integrovaný v přístrojové desce před sedadlem spolujezdce. Během aktivace jsou kryty roztrženy nebo vyklopeny v definovaných místech. Vak je objemnější než vak airbagu řidiče, k jeho naplnění se používají hybridní generátory plynu i generátory s pevnou látkou.



**Obrázek 2.5:** Čelní airbag řidiče a spolujezdce[11]

Kolenní airbag chrání dolní končetiny před střetem s interiérem vozu a také brání tělu, aby sjelo ze sedadla pod přístrojovou desku a tím zvyšuje účinnost zádržného systému. Airbag je umístěn pod volantem na spodní straně přístrojové desky nad kolena řidiče. Kolenní airbag se aktivuje společně s čelním airbagem řidiče. Vak kolenního airbagu je pevnější, povrch je potažen silikonovou vrstvou a po aktivaci se nevyfukuje.



**Obrázek 2.6:** Rozvinutý kolenní airbag řidiče ve vozidle BMW[11]

### ■ 2.4.2 Boční airbagy

Hlavový airbag chrání hlavu při bočním nárazu před střetem s vnitřním bokem vozu. Vak airbagu je konstruovaný tak, aby chránil hlavy posádky na předním i zadním sedadle nejen během nárazu, ale i bezprostředně po něm. Nafouknutí zajišťují trubkové generátory plynu, které jsou prostorově méně

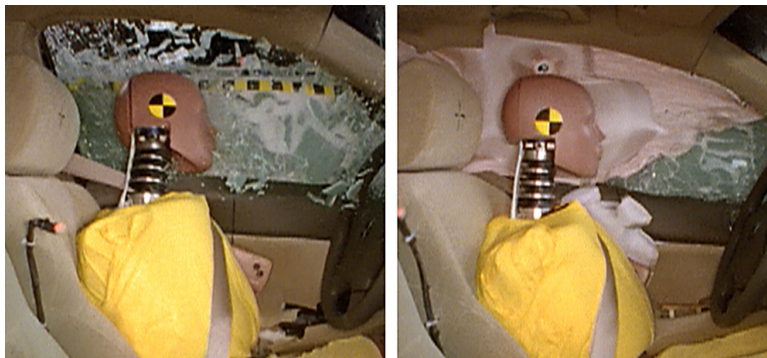


náročné. Vak totiž zůstává nafouknutý například na převrácení či kutálení.



**Obrázek 2.7:** Test hlavového a bočního airbagu při převrácení vozidla. Z fotografií je vidět, že airbagové vaky zůstávají nafouknuté. Vaky zůstávají nafouklé řádově desítky sekund. [11]

Ochranu trupu při bočním nárazu zajišťují boční airbagy. Tento druh airbagu je umístěn v opěradle vnějšího boku sedadla nebo ve dveřích. Umístěním v opěradle je docíleno lepšího vyplnění prostoru mezi břišní částí těla a bočním interiérem vozidla, a to v jakémkoliv nastavení sedadla. K naplnění vaku jsou často využívány hybridní plynové generátory a generátory plynu s pevnou hnací látkou. Některé vozy jsou vybaveny bočním Head-Thorax airbagem. Tento airbag je kombinací bočního a hlavového airbagu. Umístění a konstrukce jsou téměř totožné jako u bočního airbagu v boku sedadla. Vak je však protažený do horní části. Head-Thorax airbagy chrání tedy kromě trupu i hlavu pasažérů na pozici řidiče a spolujezdce.



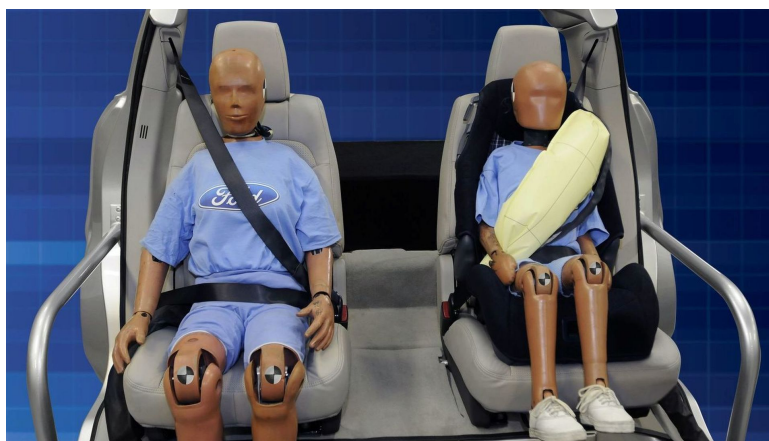
**Obrázek 2.8:** Test bočního nárazu bez airbagů obrázek vlevo vs vozidlo s bočním a hlavovým airbagem. [11]

Další ochranou pasažérů na sedadle řidiče a spolujezdce jsou centrální airbagy. Centrální airbagy chrání cestující během bočního nárazu. Narozdíl od ostatních výše zmíněných airbagů neslouží centrální airbag k zabránění střetu s interiérem vozidla, ale brání mezi vzájemným bočním střetem pasažérů. Airbag je uložený v pravé bočnici sedadla řidiče. Kromě funkce přepážky slouží i jako zábrana snižující vychýlení cestujících v příčném směru.



### 2.4.3 Speciální airbagy

Snaha o zvýšení bezpečnosti vedla k začlenění airbagu do bezpečnostního pásu. Hlavním úkolem airbagů implementovaných v bezpečnostních pásích je zvýšení ochrany hrudníků cestujících během dopravních nehod. Aktivací airbagu je zvětšena zádržná plocha bezpečnostního pásu. Větší plocha umožní lepší rozložení zádržné síly. Lepší rozložení sil snižuje tlak působící na hrudník cestujících a snižuje tak například rizika zlomení žebér nebo poškození hrudního koše. K první aplikaci do sériově vyráběných osobních automobilů došlo v roce 2011, kdy jimi byla vybavena zadní sedadla vozu Ford Explorer. O dva roky později byly nasazeny i v Mercedes Benz S-class.[12]



**Obrázek 2.9:** Airbagy v zadních bezpečnostních pásích ve voze Ford Explorer. [13]

Do skupiny speciálních airbagů je bez sporu nutné zařadit airbag pro chodce. Airbag pro chodce nechrání pasažéry uvnitř vozidla, ale chodce pohybující se před vozidlem. Airbagový systém je umístěn mimo interiér vozidla pod kapotou na zadní straně u předního skla. V předním nárazníku jsou umístěny senzory, které detekují srážku vozidla s chodcem. Pokud dojde ke střetu, dochází k nadzvednutí zadní části kapoty a nafouknutí airbagového vaku. Airbagový vak má tvar písmena U. Na prostředku zakrývá přibližně třetinu předního skla, na krajích skla se rozšiřuje podél A sloupků.

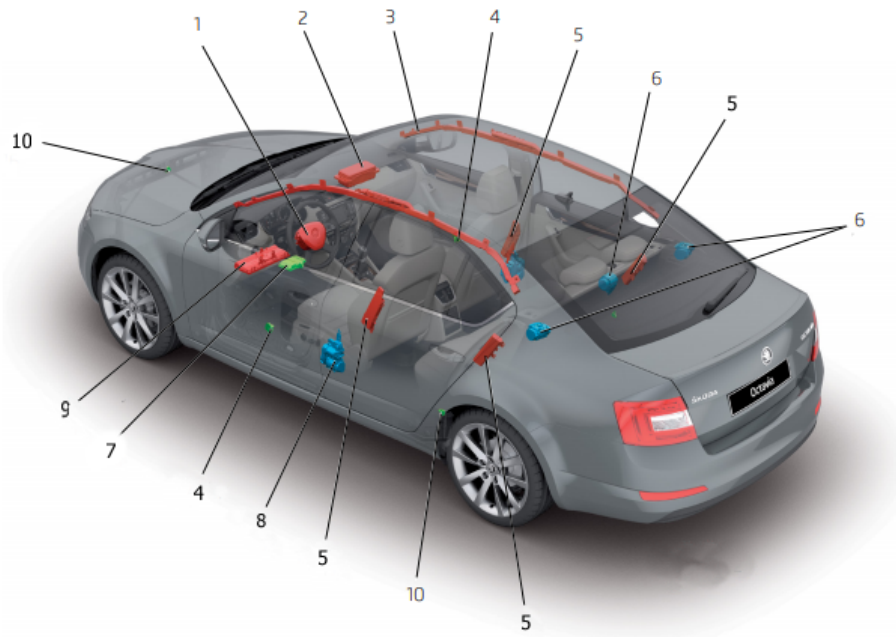


Obrázek 2.10: Airbagy pro chodce umístěný ve voze Volvo V40. [14]

## 2.5 Průběh aktivace airbagů

Airbagové systémy jsou jednou z nejspolehlivějších součástí ve vozidlech. Jsou navrženy tak, aby dokázali i po letech nečinnosti provést proceduru v přesně stanoveném čase. Povel k aktivaci jednotlivých airbagů vydává řídicí jednotka airbagů na základě údajů získaných ze snímačů nárazu. Část z celkového počtu senzorů je integrována přímo v řídicí jednotce, zbytek senzorů je externě rozmístěné po vozidle (Akcelerační, tlakové senzory atd.). Snímače zasílají informace o zrychlení či zpomalení vozidla. Tyto informace jsou zpracovávány řídicím algoritmem. Ze znalosti polohy senzorů a jejich naměřených hodnot je pak vektorovým složením stanovena pozice, směr a závažnost události. Po přijetí všech signálů algoritmus vyhodnotí, zda je událost dostatečně závažná k aktivaci bezpečnostních prvků. Součástí vyhodnocení je také rozhodnutí jaké okruhy je nutné aktivovat a kdy. Přesný čas aktivace je zde klíčový. Tělo totiž musí být ve správné pozici vůči airbagu. Správná poloha těla maximalizuje účinnost. Rychlost nafouknutí vaku je téměř konstantní, avšak poloha těla závisí na síle střetu. Společně s airbagy řídicí jednotky aktivují i další bezpečnostní prvky a procedury.

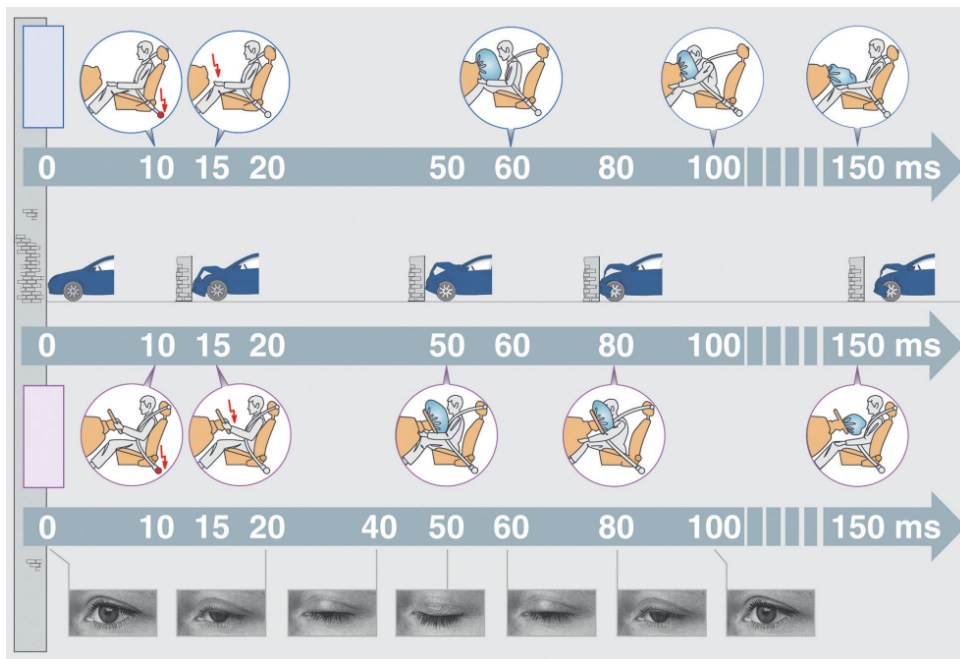
## 2. Airbag



**Obrázek 2.11:** Příklad možného rozložení airbagů a senzorů ve vozidle. Octavia III. Zelenou barvou jsou označeny senzorické a řídicí jednotka. Modře navíječe pásů a červeně moduly airbagů.[15]

1. Modul čelního airbagu řidiče ve středové části volantu
2. Modul čelního airbagu spolujezdce v palubní desce
3. Lištový modul hlavového airbagu pro sedadla vpravo pod stropem
4. Senzor tlaku ve dveřích
5. Modul bočního airbagu integrovaný do boku sedadla
6. Navíječ bezpečnostního pásu
7. Řídicí jednotka airbagů ve středovém tunelu podlahy
8. Navíječ bezpečnostního pásu s pyrotechnickým předepínačem
9. Modul kolenního airbagu řidiče
10. Externí akcelerační senzory vozidla

Jsou-li splněné kritéria aktivace, plynový generátor nafukovacího modulu nafoukne vaky. Plynové generátory pracují na bázi jednorázové pyrotechnické reakce, která vytvoří dostatečné množství plynu pro naplnění vaků. Při čelním nárazu se aktivují oba čelní airbasy a kolenní airbag u řidiče. Boční náraz spustí boční okruh airbagů na příslušné straně. Dojde-li ke kombinovanému střetu, algoritmus řídicí jednotky aktivuje čelní i boční airbagové okruhy.



**Obrázek 2.12:** Obečná časová osa čelního střetu vozidla. Aktivace čelních airbagů.[15]

V čase  $0$  dochází ke střetu vozidla s překážkou. Nejprve dochází k aktivaci mechanických bezpečnostních prvků reagujících přímo na vzniklou událost. Těmito prvky jsou bezpečnostní pásy, deformace karoserie vozidla a další. Přibližně do času  $15\text{ ms}$  řídicí jednotka vyhodnocuje jaké airbagové moduly aktivuje. Následně dochází k jejich aktivaci. Přibližně  $50\text{ ms}$  od střetu je čelní airbag nafouknutý a připravený zadržet tělo. Přistích  $30\text{ ms}$  je dopředný pohyb těla zpomalován a tělo dopadá do airbagu. Náraz vytlačí plyn z vaku a vrátí tělo zpět do vzpřímené polohy v sedadle.

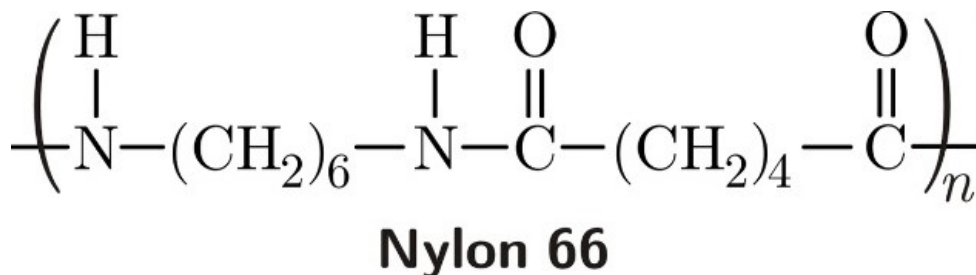
## 2.6 Konstrukce airbagů

Airbagy jsou komplexní systém, který lze rozdělit na několik logických funkčních celků: senzorický, řídicí, aktivační a výkonný. Všechny tyto části musejí spolehlivě vykonávat svou funkci za všech okolností. Konstrukčně se liší podle konkrétní aplikace a typu vozu.

### 2.6.1 Airbagové vaky

Charakteristickou částí airbagu je airbagový vak. Airbagový vak je speciální textilní tkanina s charakteristickými vlastnostmi (pevnost v tahu, malá průtažnost, tepelná odolnost a časová stálost). Vak musí vydržet extrémní šokové silové zatížení. Zároveň látka musí být tepelně odolná, lehká, minimálně prodyšná a dobře složitelná do malého objemu. Látka by také měla být šetrná vůči pokožce, aby se minimalizovala poranění od airbagu. Neméně důležitou

vlastností je i cena a dostupnost tkaniny.



**Obrázek 2.13:** Chemická struktura Polyamidu 6,6[16]

Jako ideálním materiálem splňující všechny požadavky je polyamid 6,6 (nylon). Polyamid perfektně pohlcuje energii díky poměru prodloužení a pevnosti. Látka je potahována silikonovou vrstvou, která snižuje prodyšnost. Díky silikonovému potahu jsou vrstvy polyamidu tenčí a tím klesá hmotnost i objem složeného vaku. Teplota tání polyamidového vaku je  $260^\circ\text{C}$  v kombinaci s měrnou tepelnou kapacitou  $1,6 \text{ kJ/kg/K}$  zaručuje vaku odolnost vůči teplu. Tkanina odolná vysoké teplotě umožňuje použití pyrotechnických plynových generátorů. Vysoká chemická stabilita Polyamidu 6,6 nahrává do karet vysoké trvanlivosti textilií, jelikož airbasy jsou ve vozidlech uloženy i desítky let v různých podmínkách.

Vaky čelních airbagů jsou porézní a mají otvory pro výfuk plynu. V malém procentu jsou výfuky umístěny na zadní straně. Z bezpečnostních důvodů jsou častěji umístěny na stranách vaku. Velikost, počet a množství výfukových otvorů jsou různá dle typu airbagu. U menších vaků je jednoventilový výfuk a větších pak dvouventilové odvedy vzduchu. Vyšší airbagové řady jsou vybaveny airbagovými klapkami, které prodlužují dobu plného nafouknutí vaku. V normách určených pro Evropské trhy ve volantu mají 35 - 80 l a vaky spolujezdce mají až 150 l kvůli většímu prostoru jenž musejí vyplnit.

Boční airbagové vaky jsou menší, jejich objem bývá 10-20 l. Což umožňuje jejich rychlé nafouknutí, které musí být ještě rychlejší než u čelních airbagů kvůli malým deformačním zónám.

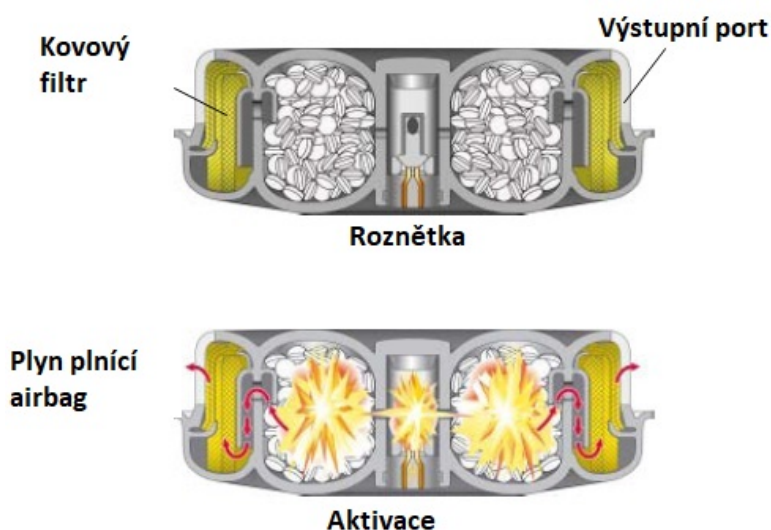
Speciální vaky jsou vaky hlavových airbagů. Jsou to vaky airbagu typu *ITS* (Inflatable Tubular Structure). Povrch těchto vaků je neprodyšný, díky čemuž po naplnění zůstane vak naplněn. Struktura vaků je buňková nebo trubková a modul airbagu je uložen v horní části *C* sloupku. Hlavové airbasy mají obsah kolem 11 l.

## 2.6.2 Zdroje plynu

Generátor plynu je nedílnou součástí airbagového modulu. Funkcí generátoru plynu je vytvořit v krátkém čase velké množství plynu, které naplní airbagový vak. Dle typu airbagového modulu je doba potřebná pro plné nafouknutí

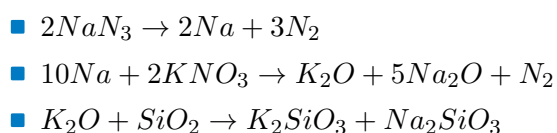
v rozpětí 20-70 ms tak, aby daný modul vyhověl stanoveným podmínkám certifikace. Rozpětí je stanoveno dle testování při normální pokojové teplotě. Množství dodaného plynu závisí na objemu vaku a jeho užití ve voze. Aktivační povel přichází z řídicí jednotky elektrickým vedením, tento signál uvede do provozu roznětku v airbagu. Roznětka aktivuje pyrotechnickou část generátoru. Plynové generátory dělíme podle způsobu dodávky plynu do dvou typů: Generátory plynu s pevnou hnací látkou, vodíkovou náloží a hybridní generátory plynu.

#### 1. Generátory plynu s pevnou hnací látkou



**Obrázek 2.14:** Generátor plynu s pevnou hnací látkou před a během aktivace.[17]

Generátory plynu s pevnou hnací látkou (propelantem) pracují na principu chemické reakce. Velikost a tvar generátoru je přizpůsobený prostoru pro umístění. Množství propelantu v běžného airbagu řidiče je 50-80 g, airbag spolujezdce je naplněn kolem 250 g. Běžné je koaxiální (ploché) a trubkové provedení. Jako propelant jsou použity granule nebo plátky azidu sodného ( $NaN_3$ ), který reaguje s dusičnanem draselným ( $2KNO_3$ ) a oxidem křemičitým ( $SiO_2$ ). Chemickými reakcemi vzniká netoxický plyn dusík, který nafoukne airbagové vaky. V tomto konkrétním případě postupně probíhají tři chemické reakce:



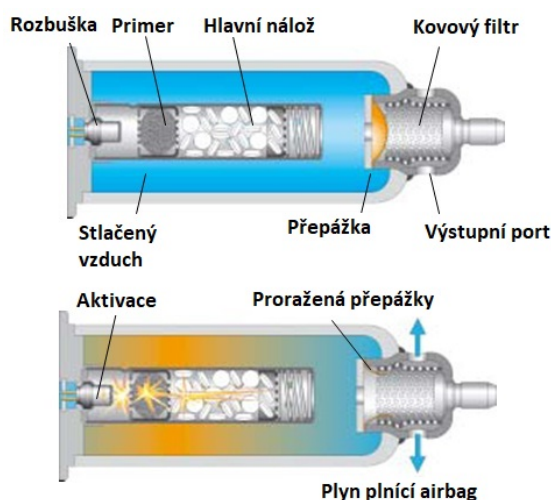
Aktivace je rozdělena do několika fází. Během první fáze signál z řídicí jednotky aktivuje roznětku v plynovém generátoru, která se zahřeje na teplotu 300 °C. Roznětka vytvoří malé množství plynu  $N_2$  a vysoce reaktivního  $Na$  (první chemická reakce), které prorazí vnitřní kryt a



vytvoří tím cestu k hlavní chemické náplni. Následují prudké reakce (druhá a třetí reakce) doprovázené hlasitou ránou. Výsledný produkt vzniká za vysokého tlaku a teploty, produktem je plyn plnící vaky. Ještě předtím, než plyn začne plnit vaky dochází k jeho úpravě. Pro úpravu jsou na výstupu z plynového generátoru kovové vláknové filtry. Hlavním cílem filtrů je zabránit pevným částicím, aby pronikly do vaků. Kromě mechanické filtrace slouží filtr i k ochlazení plynu. Takto vytvořený a upravený vzduch již proudí do vaku.

Tyto plynové generátory se využívají v čelních a bočních airbagách. Díky své ploché konstrukci jsou vhodné například do prostoru volantu.

## 2. Hybridní generátory plynu



**Obrázek 2.15:** Hybridní generátor plynu. Uvnitř tlakové nádoby je odpálena aktivační pyrotechnika otvírající cestu do vaků.[17]

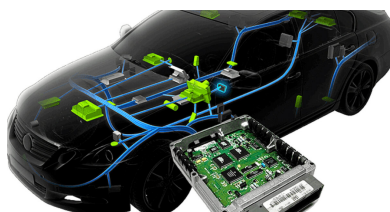
Hybridní plynové generátory slouží k napouštění kolenních, hlavových a také některých čelních airbagů spolujezdce. Chemická reakce, která produkovala plyn je nahrazena stlačeným plynem. Plyn pro nafouknutí vaku je uzavřen v nádobě a oddělen od vaku přepážkou. V tlakové nádobě je plnicí plyn stlačen dle potřeby na 200-700 bar. Jako plyn se využívá směs vzácných plynů (argon a hélium). Objemné vaky mohou být nafukovány i několika hybridními generátory, aktivovanými v krátkém čase (5-10 ms) po sobě.

Hybridní plynové generátory jsou aktivovány stejně jako generátory s pevnou hnací látkou signálem z řídicí jednotky. Signál aktivuje roznětku, která různými principy protrhne zátkovou přepážku. Protržení může být způsobeno například zvýšením tlaku v nádobě jako je na obr. 2.15. Po protržení proudí vzduch přes filtry a expanduje ve vaku airbagu.

### 2.6.3 Řídicí jednotka

Elektronická řídicí jednotka může být také označována jako uvolňovací jednotka. Řídicí jednotka slouží k vyhodnocení údajů ze snímačů, které stanovují závažnost situace. Pokud dojde k splnění stanovených podmínek pro aktivaci bezpečnostních prvků, jednotka vyhodnotí kdy a jaké bezpečnostní prvky aktivuje. Například čelní airbagové moduly a předepínače pásů při čelním nárazu.

Airbagy jsou aktivovány proudový impulsem přivedeným do pyrotechnické patrony. Patrona airbagového modulu je aktivovaný napětím 30 V. Řídicí jednotka také vypíná palivová čerpadla a zapíná vnitřní světla a varovná světla vozu. Součástí jednotky je i kondenzátor pro případ přerušení elektrického vedení od akumulátoru. Nejčastěji bývá uložena v přední části středového nosníku karoserie.



**Obrázek 2.16:** Řídicí jednotka napojená na senzory a bezpečnostní prvky jako jsou airbagy[18]

Řídicí jednotka je propojena se snímači zrychlení. Kromě zpracovávání změny zrychlení (zpomalení) za jednotku času, zohledňuje i fyzickou polohu senzoru. Znamá poloha senzoru umožňuje získat nejen absolutní velikost změny zrychlení, ale také směr. Aktuální získané informace řídicí jednotka porovnává s uloženými citlivostními parametry. Citlivostní parametry jsou závislé na typu vozidla a konkrétní výbavě a byly stanoveny experimentálně během dynamických nárazových zkoušek. Pokud tedy například vlivem projetí výmolu jeden senzor překročí hranici, tak k aktivaci nedojde, protože komplexní vyhodnocení nárazu nesplňuje podmínky aktivace.

Nové automobily disponující rozsáhlou elektro instalací mohou být osazeny vyspělejšími řídicími jednotkami, které vyhodnocují kromě snímačů zrychlení i další data o aktuálním stavu vozidla. Vstupními daty pro takové jednotky mohou být například hmotnosti cestujících, polohy a sklon sedaček. Kromě vnitřního uspořádání a stavu vozidla vstupují do řídicí jednotky také informace o okolí, kterými jsou krátkovlnné radary, lidary a kamerové systémy. Tyto systémy poskytují rozpoznání nárazu ještě před samotným nárazem, což poskytuje drahocenný čas, během kterého jednotka optimalizuje výbavu vozidla na náraz.



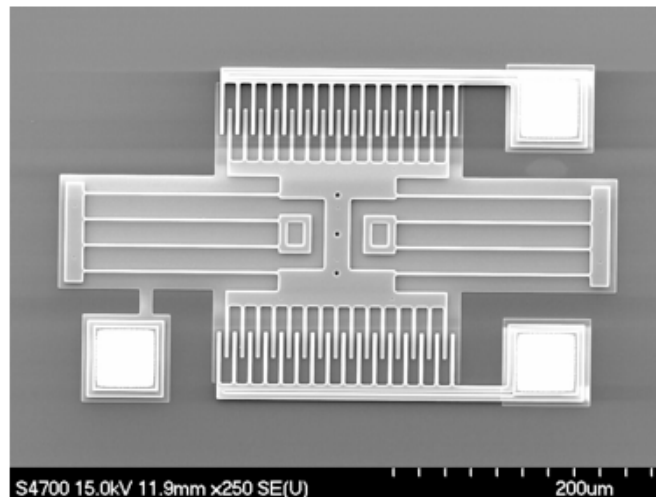
### 2.6.4 Sensory zrychlení

Senzory zrychlení (akcelerometry) zajišťují data, které vypovídají o změnách pohybu vozidla. Kromě airbagových systému jsou data ze senzorů využita také například v detekci převrácení nebo systémech stabilizace jízdy vozidla, snažící se zabránit smyku.[19]

Zrychlení se běžně udává jako násobek gravitačního zrychlení  $g$  ( $9,81 \text{ ms}^{-2}$ ). Snímače zrychlení stanovují zrychlení  $a$  nepřímo, jak je vidět ve 2.3. Snímače měří sílu  $f$ , kterou způsobuje setrvačnost známé hmotnosti vozidla  $m$ .

$$f = m \cdot a \quad (2.3)$$

Ve vozidlech jsou používány přesné jedno až tříosé akcelerometry, které měří zrychlení například ve vodorovné rovině. Měřitelné rozsahy zrychlení senzorů se pohybují kolem  $\pm 100 g$  a vzorkovací frekvenci 8-16  $\mu s$ . Většina senzorů je osazena logickou jednotkou, která řídící jednotce předzpracuje signál a tím se zkrátí rozhodovací čas řídící jednotky. Většina aktuálních senzorů je vyjma samotného měřicího členu (MEMS) plně digitální.



**Obrázek 2.17:** Jednoosá MEMS struktura používaná jako senzor akcelerace. [20]

MEMS je pohyblivá křemíková struktura mikrometrových rozměrů, která podléhá vlivu působení gravitačních, odstředivých a podobných sil. Vlivem působících sil je setrvačná hmota, která je pružně propojena s tělem, vychýlena ze základní polohy. Vychýlení se nejčastěji měří kapacitně, určité rozložení nábojů tak odpovídá působícím silám a senzor je schopen zachytit dynamické i statické zrychlení. MEMS ze své podstaty pracují spojitě a produkují analogový signál. [21]

## Kapitola 3

### Legislativa a normy airbagů

Na pasivní bezpečnosti se ve vozidlech podílí velké množství prvků. Tyto prvky jsou schopné pozitivně, ale i negativně ovlivňovat dopady nehod na lidské zdraví. Z toho důvodu je nutné normalizovat požadavky na činnost a vlastnosti jednotlivých prvků. V rámci této diplomové práce bude řešen jen jeden prvek pasivní bezpečnosti a tím bude airbag, který se řadí do kategorie zádržných systémů.

Požadavky na vlastnosti a funkci airbagových systémů jsou formulovány v předpisech Evropské hospodářské komise (EHK) a směrnicích Evropského společenství (ES). Normativní požadavky na činnost airbagových systémů se vztahují k biomechanickým kritériím poranění i k okolním podmínkám. Dále jsou v normách stanoveny typové situace nehod, tedy druhy nárazů. Airbagové systémy jsou zkoušeny v jednotlivých simulovaných situacích, kde se sleduje, jestli splňují předepsané normy.

#### 3.1 Evropská legislativa

Požadavky na vlastnosti a funkci airbagových systémů jsou formulovány v předpisech Evropské hospodářské komise (EHK) a směrnicích Evropského společenství (ES). Normativní požadavky na činnost airbagových systémů se vztahují k biomechanickým kritériím poranění i k okolním podmínkám. Dále jsou v normách stanoveny typové situace, tedy druhy nárazů. V rámci zkoušek jsou airbagy testovány pro jednotlivé situace. V následujících částech je popsán proces schvalování airbagových zádržných systémů v souvislosti s normativními požadavky vztahujícími se k airbagům včetně zkoušek.

Evropská hospodářská komise dále jen EHK, je anglicky označovaná jako UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) a byla založena v roce 1947 na podnět OSN (Organizace spojených národů). Hlavním cílem této organizace je podpořit evropský ekonomický stav a zlepšit integraci. EHK sdružuje 56 států Evropské unie, severní Ameriky, jihovýchodní Evropy a Společenství nezávislých států.[22] EHK se podílí v rámci OSN na tvorbě dopravních pravidel, tedy i stanovuje technické normy týkající se airbagových systémů pro silniční vozidla. V roce 1957 uzavřela část států „*Dohodu o přijetí jednotných podmínek pro homologaci a o vzájemném uznávání homologace,*

*výstroje a součásti motorových vozidel*“. Jedenáctého července roku 1960 k této dohodě přistoupilo i Československo. Cílem této dohody je rámcově stanovit technické parametry homologace (ověřování shodnosti) součástí a výstroje silničních vozidel. Formou předpisů jsou pak stanoveny konkrétní technické požadavky umístěné jako přílohy dohody. [23]

Připojením se k této dohodě není stát nucen dodržovat všechny podmínky stanovené dohodou. Členské státy si mohou vybrat, jaké konkrétní předpisy budou na svém území dodržovat a vymáhat. Stát je však nucen informovat generálního tajemníka OSN jaké předpisy hodlá využívat. Státy přihlášené k stejnému předpisu dodržují stejné podmínky homologace. Homologace jsou pak uznány všemi státy, které jsou přihlášené ke stejnému předpisu.

Vztah předpisů EHK a směrnic ES je následující. Státy Evropská unie vstoupily do Dohody EHK společně jako jeden člen pod záštitou Evropské Unie. Předpisy EHK jsou ekvivalentní se směrnicemi ES. Následuje výčet odpovídajících si důležitých listin formulujících normativní požadavky na činnost a vlastnosti prvků zádržných, a tedy i airbagy. Předpis EHK č.16 odpovídá Směrnici ES 77/541. Předpis EHK č.94 odpovídá Směrnici ES 96/79. Předpis EHK č.95 odpovídá Směrnici ES 96/27. Z pohledu airbagů je důležitý předpis EHK č. 114, který stanovuje „*Jednotná ustanovení pro schvalování: I. modulů airbagů pro náhradní airbagové systémy; II. náhradních volantů vybavených moduly schváleného typu; III. náhradních airbagových systémů jiných, než které byly instalovány ve volantu.*“

Airbagy jsou dle [23] definovány následovně, jako: „Airbagem cestujícího se rozumí souprava airbagu určená k ochraně osob sedících na sedadlech jiných, než na sedadle řidiče při čelním nárazu. Soupravou airbagu se rozumí zařízení instalované jako doplněk bezpečnostních pásů a zádržných systémů v motorových vozidlech, tj. systém, který v případě silného nárazu vozidla automaticky rozvine tlakem plynu v něm obsaženého pružný polštář tak, aby se omezila intenzita dotyku jedné nebo více částí těla osoby ve vozidle s vnitřním povrchem prostoru pro cestující.“

Předpis EHK č. 94 [24] definuje systémy airbagů a jejich části jako:

*Airbagem se rozumí pružný materiál tvořící uzavřený prostor, do něhož se dostává plyn z vyvíječe plynu a který zadržuje cestujícího.*

*Airbagovým systémem se rozumí skupina konstrukčních částí, která po zabudování do vozidla/vozidel plní všechny výrobcem stanovené funkce. Tento systém zahrnuje minimálně uvolňovací jednotku, která aktivuje jeden nebo více modulů airbagů, a elektrickou kabeláž, pokud existuje.*

*Náhradním airbagovým systémem se rozumí airbagový systém k dovybavení, který se dodává k úpravě motorového vozidla a který se od případného původního airbagového systému dodaného výrobcem pro toto vozidlo může lišit*

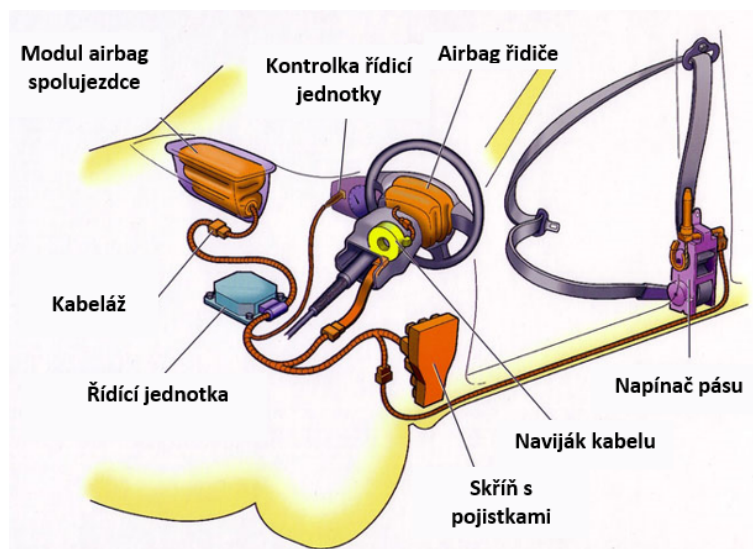
*funkčními rozměry, podobou, materiálem nebo fungováním.*

## 3.2 EKH č.114

EKH číslo 114 je ustanovení Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů, které stanovuje podmínky pro schvalování:

- I. Modulů airbagů pro náhradní airbagové systémy;
- II. Náhradních volantů vybavených moduly schváleného typu;
- III. Náhradních airbagových systémů jiných, než které byly instalovány ve volantu

Oblast působnosti tohoto předpisu se vztahuje na moduly airbagů pro náhradní airbagové systémy určené k zabudování do motorových vozidel. Dále na náhradní volanty pro vozidla kategorií  $M_1$  a  $N_1$  (V České republice stanovila kategorizaci vyhláška č. 341/2014 Sb.) vybavené modulem airbagu schváleného typu a určené k montáži jako doplňkový zádržný systém k bezpečnostním pásům a jiným zádržným systémům v motorových vozidlech a náhradním airbagovým systémům jiných, než které byly instalovány ve volantu a vybavené moduly airbagů schváleného typu, jako doplňkový zádržný systém k bezpečnostním pásům a jiným zádržným systémům v motorových vozidlech kategorií  $M_1$  a  $N_1$ . [25]



**Obrázek 3.1:** Airbagový systém a jeho jednotlivé součásti [26]

V předpisu jsou definovány airbagové systémy i jeho součásti následovně: „Airbagovým systémem“ se rozumí skupina konstrukčních částí, která po zabudování do vozidla/vozidel plní všechny výrobcem stanovené funkce. Tento systém zahrnuje minimálně uvolňovací (řídicí) jednotku, která aktivuje jeden nebo více modulů airbagů a elektrickou kabeláž, pokud existuje.

„Airbagem“ se rozumí pružný materiál tvořící uzavřený prostor, do něhož se dostává plyn z vyvíječe plynu a který zadržuje cestujícího.

„Řídící jednotkou nebo uvolňovací jednotkou“ se rozumí montážní podsestava, která zahrnuje veškeré konstrukční části, které umožňují zjištění srážky a zajišťují uvolnění airbagu.

„Kabeláží“ se rozumí veškeré elektrické vodiče a připojení, která spojují různé části celého airbagového systému navzájem a popřípadě s vozidlem.

„Modulem airbagu“ se rozumí nejmenší montážní podsestava skládající se ze zdroje energie pro rozvinutí a z airbagu, který se rozvinuje.

„Náhradním airbagovým systémem“ se rozumí airbagový systém k dovybavení, který se dodává k úpravě motorového vozidla a který se od případného původního airbagového systému dodaného výrobcem pro toto vozidlo může lišit funkčními rozměry, podobou, materiálem nebo fungováním.[25]

Airbagové moduly jsou děleny do čtyř kategorií podle toho, pro jaký směr nárazu jsou a podle polohy umístění. Kategorie *A* jsou zařízení chránící řidiče při čelním střetu. Kategorie *B* slouží k ochraně cestujících na předních sedadlech vyjma řidiče při čelním střetu. Airbagové moduly čelního střetu pro cestující na jiných než předních sedadlech spadají do kategorie *C*. Řidiče a cestující na předních sedadlech během bočního střetu chrání airbagové moduly kategorie *D*.

### 3.3 Kontrola požadavků stanovených předpisy EHK a normami

Právnícké a technické požadavky stanovené normami a předpisy EHK je v rámci legislativy nutné systematicky kontrolovat. Za tímto účelem jsou součástí EHK předpisů i části definující přesnou metodiku zkoušek. Metodika obsahuje podoby dynamických a statických destrukčních zkoušek, včetně zkušebních aparatur. Kontroly shodnosti mohou provádět jen zkušebny s mezinárodní homologační akreditací.

Homologace je tedy označení celého schvalovacího procesu, který je zahájen vstupními hodnoceními. Homologačnímu procesu mohou být podrobeny jak celé výrobky, tak jejich jednotlivé části. Po hodnocení následují testy prováděné podle norem ISO 12096 a předpisů EHK. Poslední fází je vypracování technických zpráv z výsledků testů. Technické zprávy jsou předloženy schvalovacím orgánům s cílem získat potřebné osvědčení.

Pro získání homologačního osvědčení je nutné splnit normativní požadavky stanovené normami a předpisy EHK. Vydané osvědčení je vládou vydaný a respektovaný certifikát, který schvaluje vstup výrobku na trh.

Homologační technické a právnícké požadavky platící v České republice jsou obsaženy ve vyhlášce: 341/2014 Sb. *Vyhláška o schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komu-*



## Kapitola 4

### Dynamické a statické zkoušky airbagů

Obecně zkoušky technického vybavení slouží k ověření shodnosti výsledů s předepsanými předpisy a normami. U větších celků, jakými jsou například automobily, dochází k rozložení zkoušek na zkoušky jednotlivých funkčních členů, jakými jsou například prvky pasivní bezpečnosti. Pokud všechny otestované části splňují předepsané vlastnosti, dochází k jejich začlenění do celku. Celky jsou podrobovány komplexním zkouškám, které opětovně testují jednotlivé elementy a hlavně jejich vzájemnou interakci.

Airbagové systémy jsou tedy testovány nejen samostatně, oddělené od ostatních prvků pasivní bezpečnosti, ale i společně s nimi například během destrukčních nárazových zkoušek, také označované jako "crash testy".

#### 4.1 Nárazové zkoušky

Dynamické zkoušky airbagů probíhají většinou jako nárazové zkoušky. Jak již název napovídá jsou to destrukční zkoušky. Cílem těchto zkoušek je otestovat chování prvků pasivní bezpečnosti vozidla v modelových situacích, které jsou definované dle reálných nárazů. Testy jsou hodnoceny na základě získaných hodnot biomechanických zatížení. Nárazové zkoušky lze rozdělit na zkoušky stanovující biomechanické zatížení cestujících uvnitř vozidel a vně (chodců).

Místo lidí jsou součástí testů testovací figuríny, které mají různé parametry, které umožní rozlišovat figuríny žen, mužů a dětí. Standardně je využívána například figurína *THOR-50M* substituující dospělého muže při testech čelního nárazu vážící 76,6 kg.

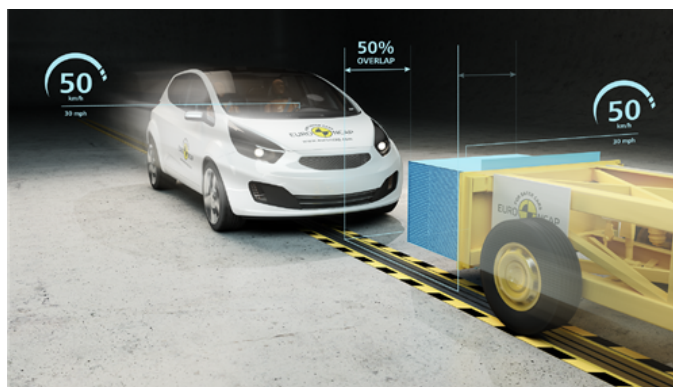


**Obrázek 4.1:** Figurína *THOR-50 M* používaná při testech čelního nárazu, umožňující přesné stanovení biomechanických rizik poranění. [28]

Nárazové zkoušky celosvětově provádí různé organizace za různých podmínek. Dynamické zkoušky v Evropě provádí nezávislá mezinárodní organizace EURO NCAP (European New Car Assessment Programme). V roce 2020 EURO NCAP provádělo například následující zkoušky:

#### 4.1.1 Čelní náraz do deformovatelné bariéry

Čelní náraz do deformovatelné bariéry má na svědomí nejvíce smrtelných a vážných zranění ze všech druhů nehod. Běžným scénářem jsou dvě vozidla jedoucí proti sobě vysokou rychlostí, která se srazí pouze částí šířky vozidla. Této situaci odpovídá test s následujícími specifikacemi.



**Obrázek 4.2:** Grafické znázornění čelního nárazu do deformovatelné bariéry v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP [29].

Testovací vůz jede rychlostí  $50 \text{ kmh}^{-1}$ . Trajektorie vozu směřuje jednou polovinou šířky vozidla proti deformovatelné bariéře. Bariéra je přichycena k vozíku vážícímu  $1400 \text{ kg}$ , který se pohybuje v protějším směru rychlostí



$50 \text{ kmh}^{-1}$ . Vozík s bariérou substituuje přední část protijedoucího vozidla střední velikosti (rodinný automobil). Ve vozidle jsou umístěny čtyři figuríny, na předních sedadlech představující průměrného muže a na zadních sedadlech děti umístěné v dětských zádržných systémech. Figuríny, vozidlo i vozík jsou vybavené senzory měřícími přetížení vzniklé nárazem. Z hodnot senzorů se poté stanovují přesné odhady rizika poranění hlavy, krku, těla a končetin.

V rámci testu se hodnotí prvky pasivní bezpečnosti, zejména deformační zóny. U vozidla se pozoruje, jak deformacemi absorbuje energii nárazu. Přední deformační zóny by se měly kontrolovaně zhroutit a zabránit například pohybu volantů a pedálů do prostoru cestujících. V prostoru cestujících jsou pak sledovány zásahy například airbagů a bezpečnostních pásů. Kromě deformační zóny vozidla je zkoumána i deformace bariéry a průběh vzájemného zpomalení. Nežádoucí je nerovnoměrná deformace bariéry nebo extrémní zpomalení vozíku. V reálném světě jsou tato vozidla nebezpečná a představují hrozbu pro ostatní účastníky silničního provozu.

#### ■ 4.1.2 Čelní náraz do nedeformovatelné bariéry s plným překrytím

Osobní vozy se testují čelním nárazem do tuhé nedeformovatelné bariéry s plným překrytím vozidla při rychlosti  $50 \text{ kmh}^{-1}$ . Testovací figuríny jsou umístěny na sedadlo řidiče a na zadní sedadlo za sedačku spolujezdce. Figuríny odpovídají svou hmotností a velikostí drobným postavám.



**Obrázek 4.3:** Grafické znázornění čelního nárazu do nedeformovatelné bariéry v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP [29].

Tento test klade vysoké nároky na zádržné systémy na předních i zadních sedadlech. Na zpomalení hrudníku a na stupeň vychýlení hrudníku jsou kladeny přísné limity, což vybízí výrobce k používání sofistikovanějších interiérových systémů zábran (airbagů).

Zkouška rozšiřuje data získané zkouškou nárazu do deformovatelné překážky. Cílem zkoušky je doplnění dat, které pomohou hledat rovnováhu parametrů zádržných systémů. Rovnováhu mezi tuhostí, která musí být dostatečně velká, aby zpomalila dopředný pohyb velké figuríny, během čelního nárazu v rychlosti  $50 \text{ kmh}^{-1}$  a systémem, který je dostatečně "jemný", aby na drobnou postavu například dítěte nevyvíjel zraňující vysoké zpomalovací síly.

### 4.1.3 Boční náraz do sloupu

Testem bočního nárazu do sloupu jsou zastoupeny situace, kdy vozidlo důsledkem vysoké rychlosti, kluzkého povrchu nebo špatným odhadem zatáčky bočně najede do tuhé překážky, kterou může být sloup či strom. Takové nehody jsou často závažné s vysokou četností úmrtí.



**Obrázek 4.4:** Grafické znázornění bočního nárazu do úzké tuhé bariéry v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP [29].

V testu se vozidlo pohybuje bokem rychlostí  $32 \text{ kmh}^{-1}$  proti úzké překážce. Vůz je umístěn kolmo ke směru pohybu nebo pod malým úhlem od kolmice. U vozidel bez středového airbagu se umísťuje jedna figurína na přední sedačku na stranu nárazu. Pokud je vozidlo vybaveno středovým airbagem jsou na přední sedadla umístěny dvě figuríny.

V tomto testu se ukazuje, jak je vozidlo schopné odolat velké síle soustředěné na malou plochu, tedy jak hluboko pronikne sloup do prostoru cestujících. Dále se sleduje, jak zafungovala boční airbagová ochrana.

### 4.1.4 Boční náraz pohyblivou deformovatelnou bariérou

Boční nárazy představují přibližně čtvrtinu všech nehod. Téměř polovina cestujících zraněných během bočního nárazu je však na opačné straně, než na které bylo vozidlo zasaženo. Rozsah poranění závisí kromě jiného na pohybu

cestujících v bočním směru. Dalším faktorem je i přítomnost pasažéra na sedadle spolujezdce.



**Obrázek 4.5:** Grafické znázornění bočního nárazu deformovatelné bariéry do vozu v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP [29]

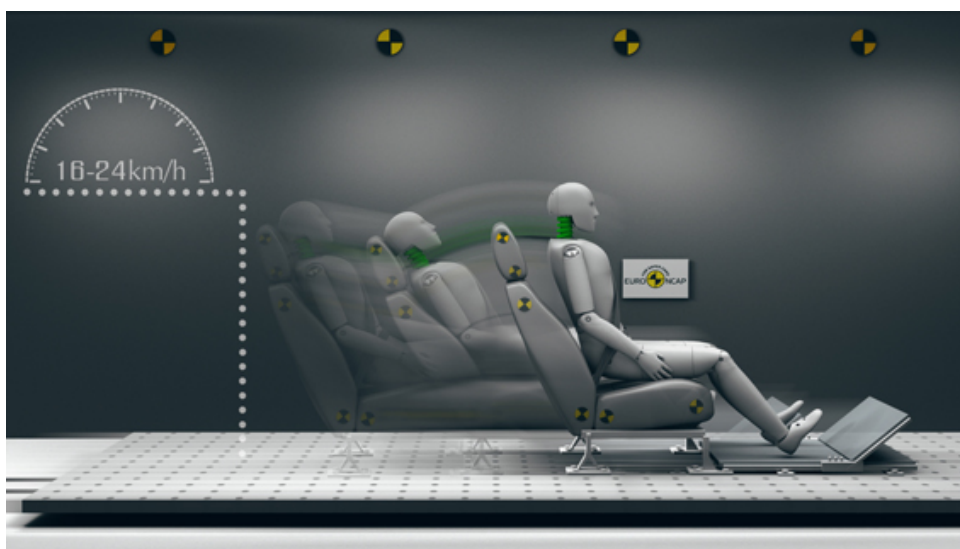
V rámci testů jsou vozy vystavovány nárazu deformovatelné bariéry ze strany řidiče rychlostí  $60 \text{ kmh}^{-1}$ . Testy se provádějí za přítomnosti figuríny na sedadle řidiče a obsazeným sedadlem spolujezdce u vozů se středovým airbagem. Podobně jako u nárazu do nedeformovatelné bariéry se sledují akční zásahy airbagů a dalších bezpečnostních prvků, které omezují boční pohyb cestujících a chrání průniku bariéry do prostoru pasažérů.

V roce 2020 se zavedl i test, kdy je vozidlo umístěno na vozík, který narazí do bariéry ze strany spolujezdce.

Vyhodnocování obou zkoušek probíhá na základě hodnot velikostí sil získaných z figurín a kamerových záběrů, které umožňují stanovit rozsahy pohybů figurín v interiéru vozidla.

#### ■ 4.1.5 Zadní náraz do stojícího vozidla

Test nárazu do zadní části stojícího vozidla v nízké rychlosti zastupuje časté dopravní havárie. Během těchto havárií dochází zřídka kdy k úmrtím, často však způsobují vážná poranění krční páteře s trvalými následky.



**Obrázek 4.6:** Grafické znázornění nárazu do zadní části vozu v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP [29].

V testu je figurína posazena na sedadlo, které je stejně jako ve vozidle uchyceno k vozíku a pohybuje se rychlostí od 16 do 24  $kmh^{-1}$ . Tento test hodnotí geometrii sedadla a opěrky hlavy z pohybu figuríny a stanovuje, jak efektivně zabraňují nežádoucímu pohybu těla.

#### ■ 4.1.6 Náraz vozidla do chodce

Vozidla se testují nejen proto, aby byla ověřena funkčnost bezpečnostních prvků pro posádku, ale také pro ostatní účastníky provozu. Obzvláště zranitelnou skupinou jsou chodci. Přibližně 14 % obětí na evropských silnicích jsou právě chodci, kteří často nejsou chráněni žádnými vlastními prvky pasivní bezpečnosti.

Euro NCAP testuje několik modelových situací střetu vozidla s chodcem, ve kterých je sledována interakce těla a vozu, pro odhad potenciálních rizik poranění ve skutečných situacích. Nárazová zkouška probíhá v rychlosti 40  $kmh^{-1}$ , což odpovídá rychlostem ve městech, kde nejčastěji dochází ke střetům.



**Obrázek 4.7:** Grafické znázornění srážky vozidla s chodcem v rámci nárazových zkoušek Euro NCAP testující horní část nohou[29].

Modelové situace dělíme podle místa nárazu těla na náraz hlavy, horní části dolních končetin (pánev + stehenní kost) a spodní části dolních končetin od kolen dolů. Pro stanovení potenciálních rizik jsou prováděny série zkoušek s různými tělesnými proporcemi figurín.

## 4.2 Statické testování airbagů

Statické testy se používají ke kontrole kvality namontovaných modulů airbagů. Testy jsou navrženy tak, aby prověřili odolnost a spolehlivost modulů a jejich schopnost vykonat předepsaný zásah. Testují se moduly nejen nové, ale i po letech používání.

V Evropě podléhají airbagové moduly a airbagové generátory plynu využíváné v silničních vozidlech testování podle normy ISO 12097 vzniklé v roce 2002. Norma je rozdělena do tří částí. První část definuje pojmy, druhá definuje zkušební metody, environmentální procesy a požadavky na airbagové moduly. Poslední část definuje zkušební metody, environmentální procesy a požadavky na generátory plynu.

### 4.2.1 Zkoušky environmentální odolnosti

Airbagové moduly jsou podrobovány sériím testů, simulující podmínky a efekty prostředí, v kterém se běžně používají. Zátěžové testy prostředí jsou navrženy s ohledem na pracovní podmínky a životnost testovaných dílů. Většina testů odolnosti je založena na cyklickém zatěžování, které simuluje pravidelné používání, vlivy počasí, údržby atd. Kompletní zkouška prostředí má za úkol zdegradovat materiály, opotřebovat modul airbagu a zjistit, zda je schopen

Test č.	Test	Číslo vzorku													
		Zkoušené vzorky								Ref. vzorky					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11-20			
1	Pády	x	x	x	x	x	x	x	x						
2	Mechanické rázy:														
	-35 °C	x	x	x	x	x	x	x	x						
	23 °C	x	x	x	x	x	x	x	x						
	85 °C	x	x	x	x	x	x	x	x						
3	Prach	x	x	x	x	x	x	x	x						
4	Vibrace a teplota	x	x	x	x	x	x	x	x						
5	Termální vlhkost	x	x	x	x	x	x	x	x						
6	Solný sprej	x	x	x	x	x	x	x	x						
7	Solární záření											x	x		
8	Teplotní šoky											x	x		

**Tabulka 4.1:** Harmonogram environmentálních zkoušek zatížení airbagových modulů.[30]

vykonávat svou práci.

Testovací sekvence je definována tak, aby co nejvíce odpovídala skutečnosti a testovaný kus po průchodu testem odpovídal modulu airbagu namontovaném a používaném ve voze. V následující tabulce je sled předepsaných testů dle normy ISO 12097-2. Dojde-li v průběhu série testů k viditelnému poškození některého z airbagových modulů, i tak musí tento modul dokončit celou testovací proceduru.

#### ■ *Pády*

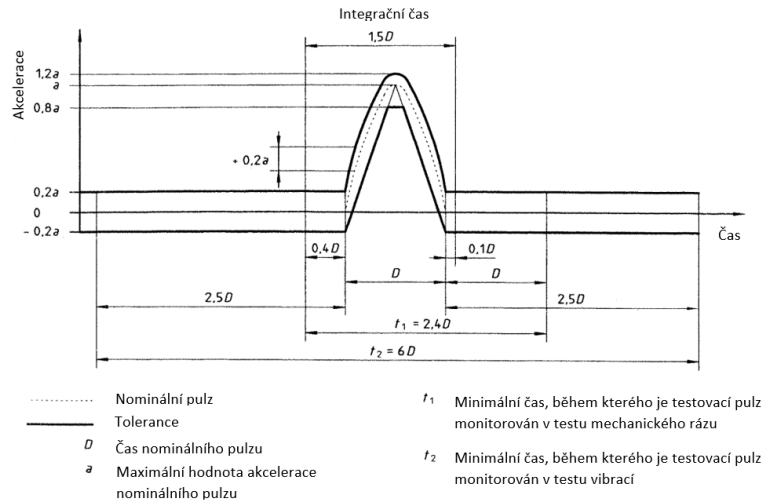
Osm airbagových modulů je podrobena pádovému testu v pokojové teplotě 23 °C. Jednotlivé airbagové moduly jsou postupně umístěny do držáku, pokaždé tak, aby modul dopadl jiným směrem. Držák je 1 - 1,2 m nad pevnou podložkou, na kterou volným pádem dopadá při uvolnění úchopu držáku.

#### ■ *Mechanické rázy*

Dvacet čtyři airbagových modulů je vystaveno šokovým rázům. Moduly jsou před testem temperovány minimálně 4 hodiny v klimatické komoře na teploty uvedené v 4.1. Testování probíhá mimo klimatickou komoru v maximálně pěti minutách od doby, kdy byl modul vyndán z komory jinak se musí vrátit zpět. Airbagové moduly s integrovanou spouští se testují zajištěné.

Každý z modulů je podroben 36 mechanickým rázům. Moduly jsou umístěny v testovací soupravě, která provede 12 půl sinusových rázu

ve všech třech teplotách. Dvanáct pulzů je rozděleno vždy na dva po sobě jdoucí pulzy pro každý směr airbagového modulu. Podoba šokových pulzů je naznačena v následujícím obrázku 4.8. Hodnoty akcelerace a doba působení rázu závisí na konkrétním typu modulu.



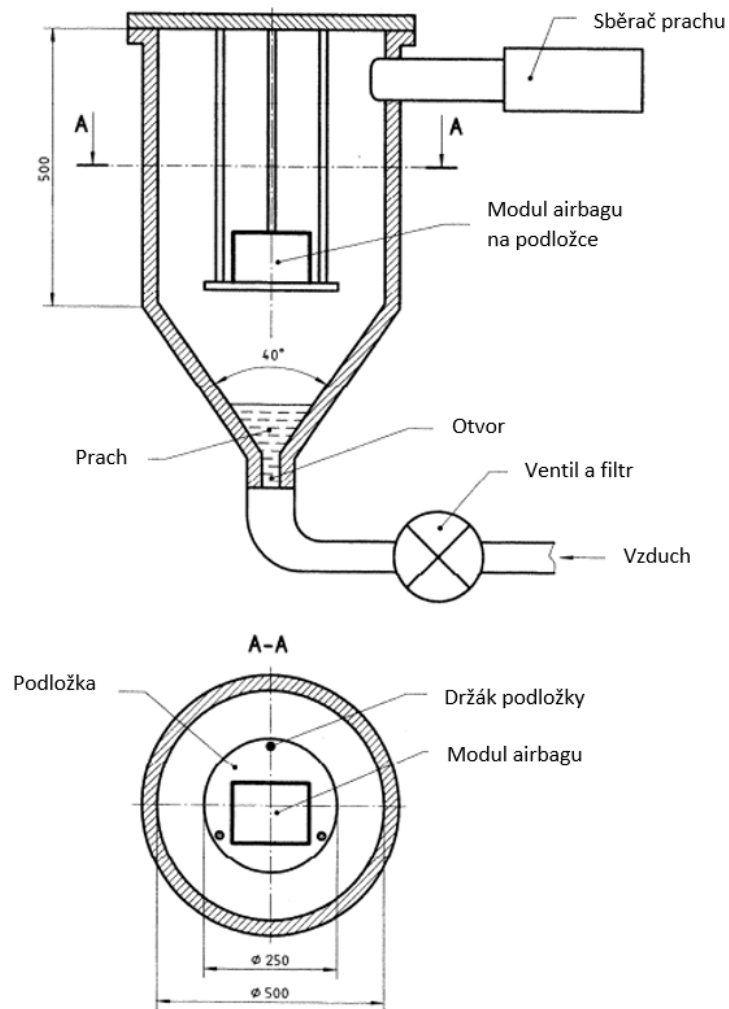
**Obrázek 4.8:** Půl sinusový pulz [30].

Testy pádů a mechanických rázů simulují zacházení, přepravu a montáž airbagového modulu na počátku jeho používání.

#### ■ Prach

V prachovém testu jsou moduly airbagů vystaveny působení prachových částic. Moduly jsou umístěné v prachové komoře v poloze, ve které jsou namontovány ve vozidlech. Celý test trvá pět hodin. S periodou 20 minut se na dobu pět sekund zapíná kompresor, který víří prach uvnitř komory. Používaný prach je normovaný dle normy ISO 12103-1, A4 hrubý zkušební prach. Na následujícím obrázku je schéma zkušební prachové komory.



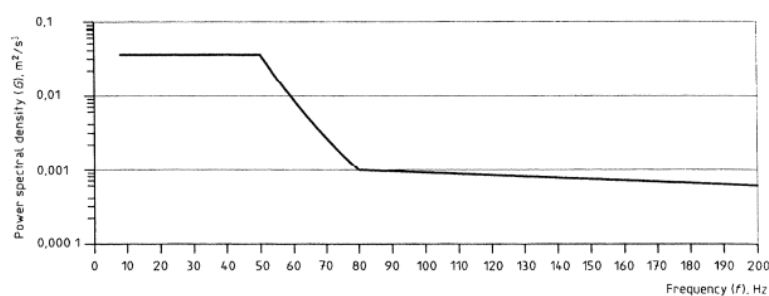


**Obrázek 4.9:** Komora pro prachový test, rozměry jsou uvedené v *mm* [30].

Průměr otvoru pro vstup tlakového vzduchu je  $1,5\text{ mm}$  a tlak  $550\text{ kPa}$ .

■ *Současné působení vibrací a teploty*

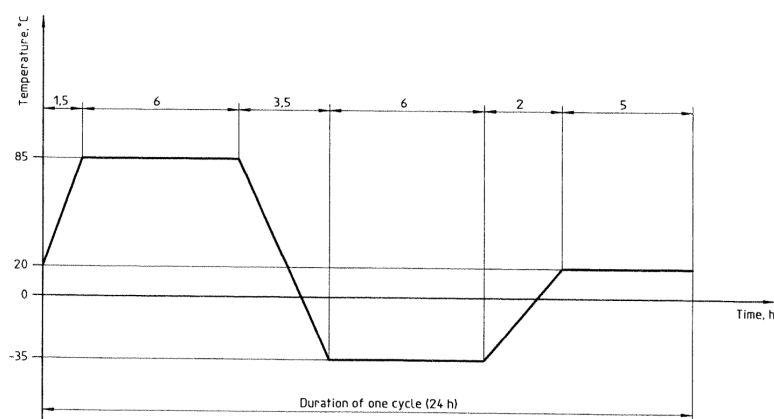
Úkolem tohoto testu je prověřit odolnost vůči vibracím za extrémní teploty na airbagové moduly. Na moduly působí vibrace o náhodné frekvenci a energii viz obrázek 4.10.



**Obrázek 4.10:** Rozsah vibrací aplikovaných na moduly airbagů[30].

Test probíhá uvnitř klimatické komory, kde se mění teplota podle harmonogramu z 4.11. Všech osm airbagových modulů je testováno najednou. Airbagy jsou různě natočeny v držácích, aby vibrace působili pokaždé v jiném směru a po dobu 24 hodin na ně působí vibrace společně s měnící se teplotou.

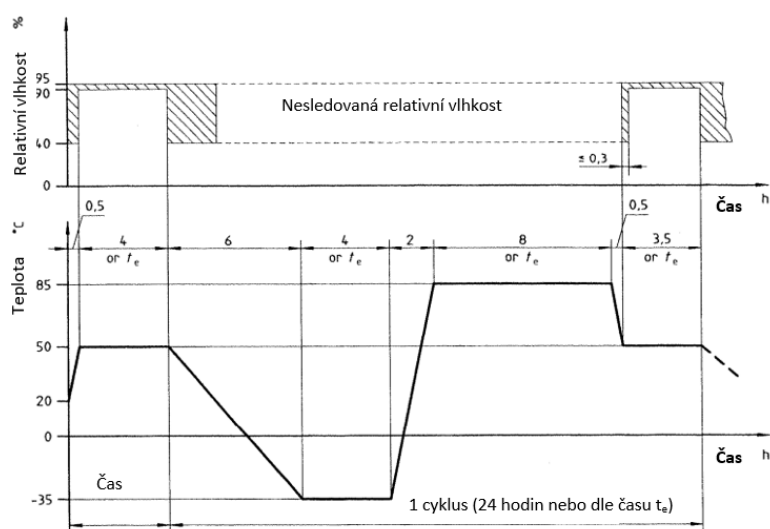
Tento test simuluje běžné prostředí, ve kterém jsou airbagové moduly téměř celou dobu své životnosti.



**Obrázek 4.11:** Teplotní harmonogram v průběhu vibrační zkoušky [30].

#### ■ Termální vlhkost

Úkolem testu je prověřit odolnost komponent proti vzdušné vlhkosti za různých teplot. Zkouška probíhá v recirkulační klimatické komoře. Podobně jako u předchozí zkoušky je stanovený harmonogram definující závislost relativní vlhkosti a teploty v čase.



**Obrázek 4.12:** Teplotní harmonogram v průběhu vlhkostní zkoušky s úrovněmi relativní vlhkosti [30].

Smyslem testu je podobně jako u vibračního testu simulovat prostředí, ve kterém se airbag nachází téměř po celou dobu své životnosti a zjistit, jestli nedochází k nežádoucím jevům.

#### ■ Solný sprej

Solné prostředí, kterému jsou v testu airbagové moduly vystavovány simuluje chemicky rozmanité prostředí, které podporuje korozi. Cílem testu je prověřit korozní odolnost.

Test je prováděn v chemicky odolné komoře, do které ústí tryska rozprašovače. Rozprašovač generuje slanou mlhu, která vznikne rozpuštěním  $NaCl$  (chlorid sodný) v demineralizované vodě. Rozprašovaná kapalná směs obsahuje 5 %  $NaCl$ . V komoře je nutné zajisti hodnoty  $pH$  mezi 6,5 a 7,2 za teploty 20 °C. V době aplikace korozivní směsi je nutné sledovat a udržovat hodnotu  $pH$  v mezích. Za tímto účelem je možné přidávat  $NaOH$  (hydroxid sodný). Důležité je, aby byla mlha v komoře homogenní v celém prostoru.

Všech osm airbagů je umístěno do mlžné komory, kde se podrobují zkouškové proceduře. Každý testovaný kus prochází třemi 22 hodinovými cykly. Teplota v mlžné komoře se pohybuje mezi 30 až 35 °C v průběhu depozice mlhy. Na začátku každého cyklu jsou první dvě hodiny moduly vystavovány zapnutým rozprašovačům. Zbýlých 20 hodin jsou rozprašovače vypnuté. Po posledním cyklu je slaný roztok odstraňován proudem vzduchu o teplotě 55 °C po dobu jedné hodiny.

#### ■ Solární záření

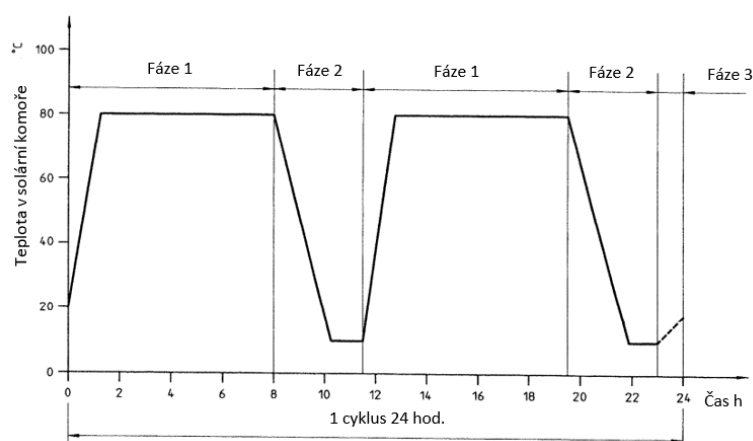
Vlnová délka	Zastoupení záření %	Před 4 mm sklem %	Za 4 mm sklem %
280 - 320	$0,5 \pm 0,2$	0,07	$<0,04$
320 - 360	$2,4 \pm 0,6$	0,61	$1,8 \pm 0,5$
360 - 400	$3,2 \pm 0,8$	0,88	$3,4 \pm 0,8$
400 - 520	$17,9 \pm 1,8$	0,89	$19,2 \pm 1,9$
520 - 640	$16,6 \pm 1,7$	0,89	$17,8 \pm 1,8$
640 - 800	$17,3 \pm 1,7$	0,83	$17,3 \pm 1,7$
800 - 3000	$42,1 \pm 8,4$	0,8	$40,5 \pm 8,1$

**Tabulka 4.2:** Spektrální rozdělení simulovaného záření. Pro získání těchto hodnot byly použity metalické halogeny.[30]

V přirozeném prostředí jsou airbagové moduly vystavovány různému druhu záření, které způsobuje změny vlastností použitých materiálů. Nejběžnější záření působící na komponenty vozidel je solární záření. Airbagové moduly jsou včetně interiérových krytů vystaveny umělému solárnímu záření.

K simulaci solárního záření se používají metalické halogeny. V tabulce 4.2 je procentuální rozložení slunečního záření v závislosti na vlnové délce. Aby se záření vyzařované zdrojem více podobalo slunečnímu záření, jsou v dráze mezi zdrojem a testovací plochou umístěny filtry. Systém filtrů zajistí odpovídající procentuální zastoupení.

Hlavními prvky solární komory jsou zdroj intenzity o výkonu  $830 \pm 80 \text{ W/m}^2$  a systém filtrů. Jelikož jsou interiéry vozů chráněny před přímým slunečním zářením skleněným oknem je i do komory mezi zdroj a testovaný kus umístěno 4 mm sklo. Program zkoušky solární radiace probíhá v cyklech popsaných níže 4.13.



**Obrázek 4.13:** Suchý klimatický cyklus testu solárního záření [30].

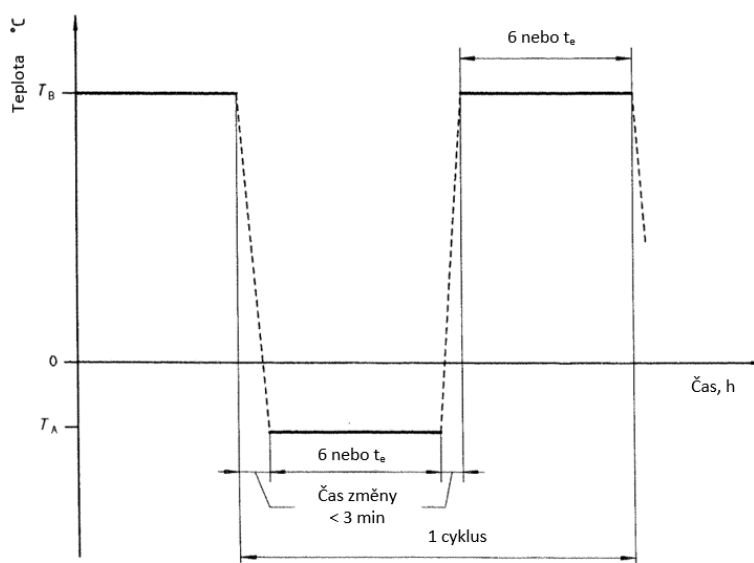
#### ■ Teplotní šoky

Parametr	Fáze 1	Fáze 2	Fáze 3
Ozařování	$(830 \pm 80) \text{ W/m}^2$		Pokožkové podmínky
Relativní vlhkost	< 30 %	> 55 %	
Ohřev	1 °C/min		
Chlazení		0,5 °C/min	
Teplota v komoře	80 °C	10 °C	
Čas	8 h	3,5 h	

Tabulka 4.3: Cyklus solární zkoušky

Přirozeným jevem, kterému jsou airbagové moduly vystaveny během své životnosti jsou šokové změny teploty. Dvojice z množiny zkoušených airbagových modulů jsou vystaveny cyklickým šokovým změnám teploty.

Test probíhá v klimatických komorách. Moduly jsou vystavovány teplotám  $T_A = -35^\circ\text{C}$  a  $T_B = 85^\circ\text{C}$ , mezi kterými periodicky přechází. Celkový počet cyklů je roven 300. Samostatný cyklus je vyobrazen na schématu 4.14.



Obrázek 4.14: Cyklus zkoušky šokové teplotní změny[30].

#### 4.2.2 Aktivační zkoušky

Za účelem ověření předepsané funkčnosti vyrobených airbagových modulů jsou prováděny statické aktivační zkoušky. Aktivační zkoušky se provádí na náhodně vybraných airbagových modulech z výroby. Některých z těchto modulů prochází před aktivační zkouškou výše zmíněnými environmentálními testy. Následně se porovnávají výsledky zkoušek zatížených a nezatížených environmentální zkouškou. Kromě sériově vyráběných airbagů jsou testovány









## Kapitola 5

### Návrh systému zefektivňující airbagové aktivační zkoušky

Motivací pro zavedení polohovacího kamerového systému je zrychlení, zpřesnění airbagových testů a v konečném důsledku zkvalitnění výstupů zkoušek. Pozice a počet kamer je definována normou, typem vozu, testovaným airbagem a dle specifikace zákazníka, tak aby zorné pole co nejlépe snímalo aktivaci airbagu. Doposud bylo nutné před každou zkouškou manuálně nastavit kamerová snímací zařízení do přesně předepsaných pozic.

Manuální nastavování je časově náročné a snadno může vést k odchylkám poloh, jež způsobují nežádoucí různorodost záznamů. Navrhovaný systém by proto měl částečně až plně automatizovat proces pozicování kamer do definovaných poloh a tím postupně eliminují výše zmíněné vlivy ručního nastavování.



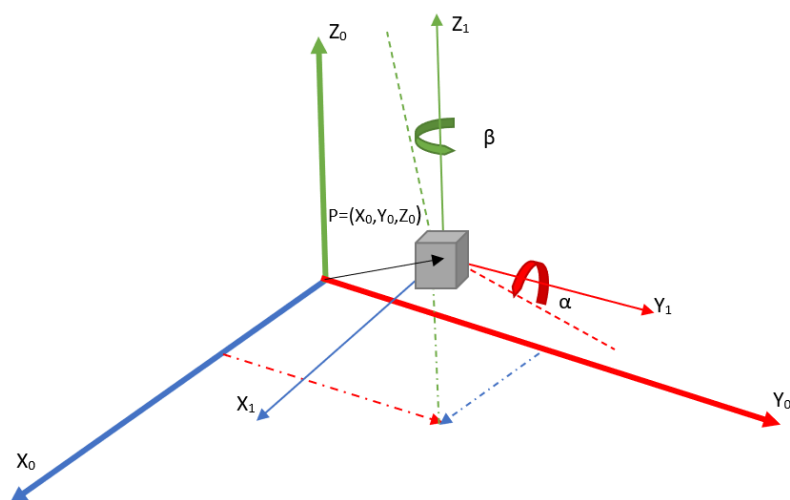
**Obrázek 5.1:** Snímek po zkoušce, kde je vidět část kostry vozu s interiérem osazeným airbagovým modulem. Dále jsou v popředí vidět vysokorychlostní kamery ručně nastavené do pozic pomocí stativů[31].

## 5.1 Technické požadavky a vlastnosti systému

Požadavky kladené na navrhovaný polohovací systém a jeho parametry lze rozdělit na funkční a provozní. Funkční požadavky mají vliv na funkčnost a pojednávají o technických vlastnostech, parametrech a limitách týkajících se samotného procesu nastavování kamer a jsou cíleně voleny nebo navrhovány bez vnějších omezení. Provozní požadavky omezují množinu možných řešení. Omezení jsou pevně dána podmínkami ve zkušebně, rozpočtem, doprovodnými činnostmi souvisejícími se zkouškou a dalšími.

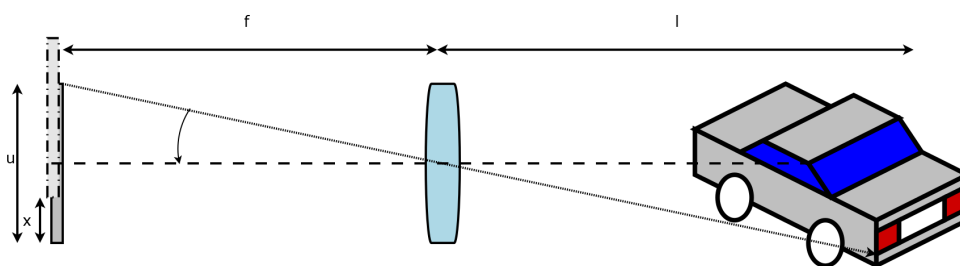
### 5.1.1 Opakovatelnost

Hlavním cílem polohovacího kamerového systému je přesné a opakovatelné dosažení předem definovaných poloh a úhlů kamery. Pozice kamery je dána dvojicí souřadnicových systémů. Statický souřadnicovým systémem určující polohu kamery v rámci prostoru zkušebny  $X_0, Y_0, Z_0$ . Pozice kamery na polohovacím mechanismu je dána souřadnicovým systémem  $X, Y, Z$  a dvojicí úhlů  $\alpha$  a  $\beta$ .



Obrázek 5.2: Osy pohybu kamer.

Poloha objektu v obrazu se mění s pohybem kamery. Pro demonstraci posuvu je dána ukázková situace: kamera s rozlišením  $2048 \times 1952$ , velikostí pixelu  $px = 0,0135 \text{ mm}$ , objektivu o ohniskové vzdálenosti  $f = 35 \text{ mm}$  a natáčenému objektu ve vzdálenosti  $l = 750 \text{ mm}$ .



**Obrázek 5.3:** Schéma ukázkové situace posunutí obrazu vlivem posuvu kamery

$$n = \frac{x}{px} = \frac{1}{0,0135} = 74$$

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{x}{f}\right) = 1,637^\circ \quad (5.1)$$

$$\delta = \tan(\alpha) l = 21,43$$

$$\delta_1 = \tan(\alpha_1) l = 13,09$$

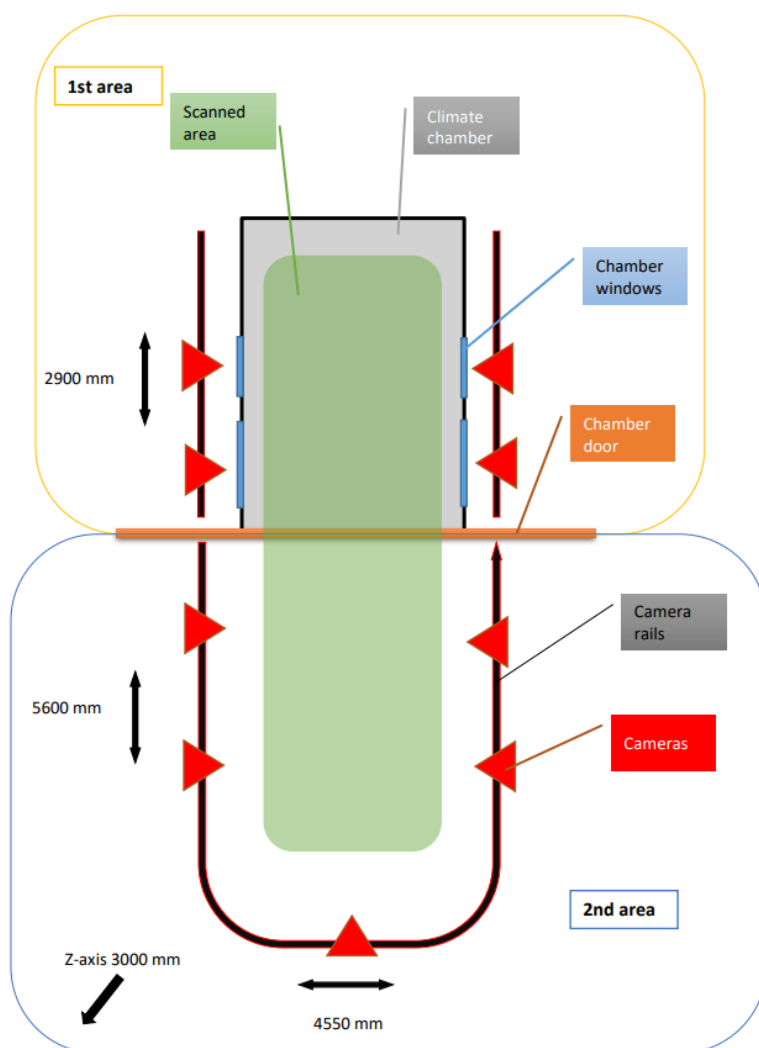
$$x_1 = 0,611 \quad (5.2)$$

$$n_1 = \frac{x_1}{px} = \frac{0,611}{0,0135} = 45$$

Z rovnic 5.1 a 5.2 je zřejmý vliv změny polohy  $x$ . Dojde-li k posunutí kamery o  $1 \text{ mm}$  způsobí to zdánlivé posunutí snímaného objektu o  $21,43 \text{ mm}$ , což na záznamu představuje posuv objektu o 74 pixelů. Zároveň výpočet pro vychýlení kamery o  $1$  stupeň  $\alpha_1 = 1^\circ$  způsobí posun objektu v obraze o 45 pixelů což odpovídá posuvu objektu o  $13 \text{ mm}$ . Pro zajištění shodnosti záznamů je nutné, aby rozdíl v poloze kamer na osách u periodicky se opakujících zkoušek zůstal v řádech milimetrů a shodnost úhlů v jednotkách stupňů. Důležitá je vysoká opakovatelnost pohybu. Maximální odchylky, které může systém vykazovat, jsou dány v rovnicích 5.3, kde  $X_1, Y_1, Z_1, \alpha_1, \beta_1$  označují počáteční polohy kamery a  $X_d, Y_d, Z_d, \alpha_d, \beta_d$  značí definovaný posun.

$$\begin{aligned} X &= X_1 + X_d \pm 1 \text{ mm} \\ Y &= Y_1 + Y_d \pm 1 \text{ mm} \\ Z &= Z_1 + Z_d \pm 1 \text{ mm} \\ \alpha &= \alpha_1 + \alpha_d \pm 1^\circ \\ \beta &= \beta_1 + \beta_d \pm 1^\circ \end{aligned} \quad (5.3)$$





**Obrázek 5.4:** Schéma laboratoře pro aktivační zkoušky airbagů.

Prvním místem je klimatická komora s postranními a čelními okny. Testovaná sestava se nachází uvnitř klimatické komory, kde je po dosažení požadované teploty provedena aktivace airbagových modulů. Kamery zaznamenávají průběh aktivace skrze omezenou plochu oken. Okna zde zároveň slouží i jako ochranná bariéra pro vysokorychlostní kamery, které jsou chráněny například proti teplotám uvnitř komory. Rozsah systému v části kolem komory musí umožňovat nastavení kamer do definovaných pozic u oken.

V oblasti kolem komory postačuje nastavování kamer ve výše zmíněných osách bez osy  $Y$ . Osa  $Y$  je definována rovinou rovnoběžnou s rovinou oken, která umožňuje rotaci kamery. Pohyb kamery je pouze v horizontálním a vertikálním směru.

Druhá oblast se nachází před klimatickou komorou. Příklad prostoru před komorou je možné vidět na obrázku 5.1. Testovaný objekt je umístěn na





jako odtaž plynů vzniklých během aktivace airbagového modulu. Odtaž plynů zlepšuje viditelnost na zkoušenou sestavu během zkoušky a odsává z prostoru zkušebny nežádoucí plyny.

Na stropní konstrukci je umístěn ještě výše zmíněný osvětlovací systém. Tento systém je statický, světla jsou upevněna v neměnných polohách během všech aktivačních zkoušek airbagů. Kromě pozice světel je důležité zohlednit i jejich vysoké provozní teploty, které by neměly navrhovaný systém ovlivnit. Tyto prvky lze brát jako zastřešení omezující pohyb polohovacího kamerového systému. Horní mez je tedy (osa  $Z$ ) přibližně 3000 mm od podlahy.

Snímaná oblast před komorou, ve které se testované součástky vždy nacházejí je krychlová. Krychle je široká 2000 mm, dlouhá 3500 mm a vysoká 2500 mm a spodní stěna je ve výšce 400 mm.

Ve zkušebně je z praktického hlediska výhodnější závěsný systém. Potřeba závěsného systému plyne z nutnosti přepravovat těžká a rozměrná břemena s testovanými objekty do snímaného prostoru. Břemena se zkušebnou pohybují na vozících po podlaze. Součásti navrhovaného systému nemohou tvořit trvalou zábranu bránící převozu testovaných vzorků. Trvalou zábranou je myšlena obtížně rozebíratelná překážka nebo překážka, jejíž opětovná instalace bude způsobovat odchylky. V případě snadno odmontovatelné bariéry by čas demontáže a zpětné montáže neměl přesahovat jednotky minut. Kromě časových požadavků je nutné zachovat i přesnou geometrii zaručující přesné polohování kamer v prostoru.

Shrnutí požadavků je následující: Systém by měl být schopen zaznamenat aktivaci airbagu uvnitř i vně tepelné komory. Stabilní uložení kamer je také klíčové. Tuhost systému musí být dostatečná, aby během testování nedocházelo k pohybu (houpání, kmitům) kamer. Cena a míra automatizace bude také hrát roli při hodnocení návrhů a volbě realizace. Zároveň je nutné počítat s nezávislým pohybem jednotlivých kamerových držáků spolu s jejich ovládací, datovou a napájecí kabeláží.

Schéma 5.4 ukazuje přibližnou podobu a podrobnější požadavky navrhovaného systému. Systém lze pomyslně rozdělit do dvou částí (1st, 2nd area). Na část vedle tepelné komory a část před tepelnou komorou. Dělicí rovinou jsou posuvné dveře klimatické komory, tvořící fyzickou bariéru mezi prostory. První část umožňuje ukotvení systému i k podlaze. Zároveň stačí pohyb pouze ve dvou osách, třetí osa je dána úrovní oken. Na každé straně komory snímají aktivaci airbagu dvě kamery. Komplikovanější požadavky přináší část před komorou. Zde je umístěno pět snímacích zařízení na nelineární trajektorii ve tvaru  $U$ . Konstrukce zde musí být upevněna pouze do stropní konstrukce, bez zásahu do podlahy. Výška konstrukce je v obou částech stejná přibližně 2500 mm.



- 2 body: Celkový čas nastavení je nižší než: 2 *min*
- 1 bod: Celkový čas nastavení delší než: 5 *min*

#### ■ Rozsah pohybu

Rozsahem pohybu je dána největší možná prostorová variace umístění kamer. Celková variace všech dosažitelných poloh kamer se porovnává s prostorem aktivačním a stanovuje se nejlepší pokrytí.

- 3 body: Plné pokrytí obou testovacích oblastí.
- 2 body: Plné pokrytí jedné z testovaných oblastí.
- 1 bod: Částečné pokrytí jedné z oblastí

#### ■ Cena

Cena systému je jeden z provozních faktorů, který bude ovlivňovat schopnost zkušebny pořídit si navrhovaný systém. Díky komplexnosti navrhovaného systému a kolísající ceně materiálů a komponent budou ceny u jednotlivých návrhů odhadnuty. Uvedené ceny jsou bez DPH.

- 3 body: Celková cena do 2 000 000 Kč
- 2 body: Celková cena do 3 000 000 Kč
- 1 bod: Celková cena více než 3 000 000 Kč

#### ■ Stupeň automatizace

Stupeň automatizace bude také předmětem hodnocení. Stupněm automatizace lze charakterizovat jako počet ovládaných stupňů volnosti pohybu kamery.

- 3 body: Plně automatizovaný systém 3 osy a 2 úhly
- 2 body: Částečně automatizovaný pouze osy
- 1 bod: Částečně automatizovaný pouze úhly

#### ■ Prostorová náročnost

Prostorová náročnost vypovídá o nutnosti změn dosavadního vybavení a prostorů zkušebny. Dále také vypovídá o vztahu mezi navrženým systémem a běžným provozem zkušebny, který zahrnuje i přepravu rozměrných předmětů.

- 3 body: Systém lze umístit do stávajícího prostoru zkušebny a umožňuje hladký přesun předmětů
- 2 body: Systém nelze umístit do stávajícího prostoru zkušebny nebo umožňuje hladký přesun předmětů
- 1 bod: Systém nelze umístit do stávajícího prostoru zkušebny a umožňuje hladký přesun předmětů

Všechny návrhy budou bodově ohodnoceny a body zapsány do tabulky.

### 5.2.1 Návrh 1

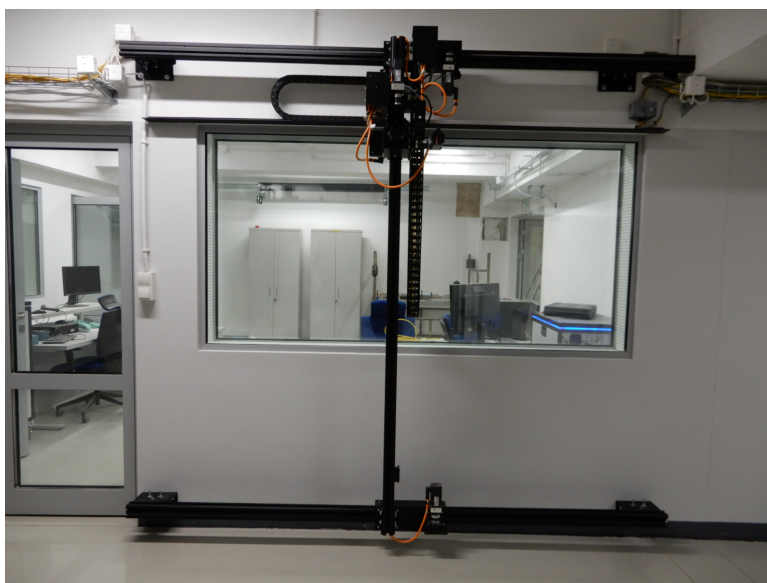
První návrh je inspirován konstrukcí jeřábů. Na trhu je množství jeřábových systémů (portálové, podvěsné, mostové...), jejichž prvky by bylo možné využít, jako základní stavební komponenty polohovacího systému. Například portálové jeřáby umožňují lineární pohyb v osách  $X$  a  $Y$ . Pohyb v ose  $Z$  je zajištěn navijákem. Jednou z výhod je velké množství komponent jeřábů s širokým intervalem technických parametrů. Nosnosti jeřábů se pohybují od desítek  $kg$  až po desítky tun. Obdobně je na tom i délka vedení, která může být až desítky metrů. Nosnost, délka a další parametry komponent se dají vybrat z katalogu a systém tak naddimenzovat dle potřeby. Další výhodou u některých jeřábových systémů je i dostupnost automatického řízení pohybu jeřábu, která zajistí rychlejší ustálení břemena a tím zkrátí celkový čas nastavování polohy.



**Obrázek 5.5:** Ukázka portálového jeřábu, jehož komponenty by bylo možné použít při konstrukci polohovacího systému [32].

Systém by bylo možné umístit na nosné nohy, nebo zavěsit na novou nebo již existující stropní konstrukci. Poloha nohou by byla definována tak, aby umožňovala pohyb testovaných sestav zkušebnou. Nosné nohy by se umístily do prostorů, kudy zkoušené sestavy neprojdějí.

V případě závěsného systému by byla rovnou zajištěna podlaha bez překážek. Nevýhodou závěsného systému je jeho složitější instalace a údržba. Pokud by se lineární vedení včetně motorizace stabilně zavěsilo na stávající konstrukci tak, aby se pohybovalo pod osvětlovacím systémem a digestoří, tak by hrozilo, že část komponent bude vyčnívat do úrovně hlavy obsluhy. V tomto případě by hrozilo nebezpečí poranění hlavy obsluhy pohybující se v daném prostoru. Stropní konstrukci by bylo možné upravit tak, aby se vedení dostalo výše a eliminovalo se nebezpečí poranění.

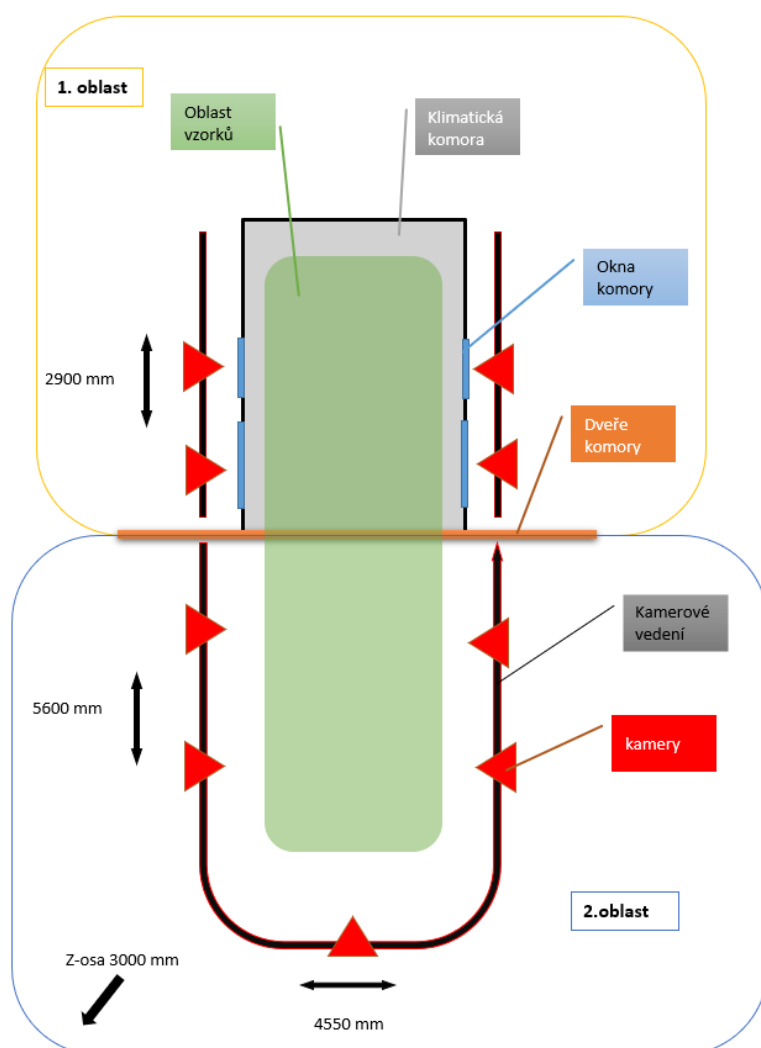


**Obrázek 5.6:** Dvouosé lineární vedení HUDE.

Lineární posuvy v osách  $X$  a  $Y$  lze využít bez větších úprav. V případě navijáku v ose  $Z$  by bylo obtížné dosáhnout ustálení pohybu kamer a přesně nastavit úhly snímání. Naviják by bylo nutné nahradit lineárním posuvem. Lineární posuv by se pevně vetkl do horního pojezdu tak, aby se nevychyloval z vertikálního směru.

Použitelné mohou být i některé kočky (jezdce) osazené vlastními motory zajišťující pohyb po proflech vedení. Rychlost pohybu je od  $1\text{ m/min}$  do  $6\text{ m/min}$ . Dosažení stanovené pozice by tedy trvalo maximálně desítky vteřin. Nutností takového systému je možnost instalace většího množství samostatných pohyblivých jednotek, které lze ovládat nezávisle na ostatních.

V ose  $X$  by tedy muselo být více příčných pojezdů. S rostoucím počtem pojezdů se však komplikují provozní situace, kdy je více kamer umístěno na totožné souřadnici osy  $Y$ . V takovém to případě si příčné pojezdy dvou rozdílných kamer svou šířkou brání v dosažení definované polohy. Vzniká zde tedy předpis pro nejbližší možné umístění kamer v ose  $Y$ . Nejbližší možné přiblížení je rovné největší šířce pojezdu ve směru osy  $Y$ . Možností, jak zajistit více kamer v jedné souřadnici osy  $Y$ , je umístění dvou  $Z$  vedení na jeden příčný posuv rovnoběžný s osou  $X$ .



**Obrázek 5.7:** Návrh konstrukce pomocí jeřábového řešení. S dvojicí Z posuvů na jedné příčnici.

Opakovatelné dosažení polohy jezdců se pohybuje od  $\pm 0.2 \text{ mm}$  do  $\pm 10 \text{ mm}$  v závislosti na konkrétním výrobku a způsobu měření polohy. U lineárních pojezdů lze použít absolutní snímání polohy. Při inicializaci si systém otuká nulovou polohu, ze které se pak přesune do definované polohy. Pro zajištění přesné polohy by bylo lineární vedení osazeno pravítkem. Pojezd by byl osazen senzorem, který by snímal pulzy a podával informaci o aktuální poloze. Další možností, jak by se dala zjišťovat aktuální poloha, je osazením osy motoru kódovacím kotoučem. Přesně měřený úhel natočení motoru by odpovídal odpovídajícímu posuvu v lineárním směru některé z os.

S dlouhým vedením je nutné uvažovat i teplotní dilatace. V průběhu roku mohou teploty ve zkušebně kolísat o jednotky stupňů. V následujících výpočtech bude stanoveno prodloužení vedení při změně teploty o  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vedení

uvažujeme v zavěšeném stavu o délce 8000 mm v ose  $Y$ , 5000 mm v ose  $X$  a 2000 mm v ose  $Z$ .

$$l_{0y} = 8000 \text{ mm}, l_{0x} = 5000 \text{ mm}, l_{0z} = 2000 \text{ mm},$$

$$\alpha_{ocel} = 13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \Delta t = 5$$

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

$$l_y = 8 \cdot (1 + 13 \cdot 10^{-6} \cdot 5)$$

$$l_y = 8,00052 \text{ m}$$

(5.4)

$$\Delta l = l - l_0$$

$$\Delta l_x = 0,325 \text{ mm}$$

$$\Delta l_y = 0,52 \text{ mm}$$

$$\Delta l_z = 0,13 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{celkove} = \sqrt{(\Delta l_x)^2 + (\Delta l_y)^2 + (\Delta l_z)^2} = 0,62 \text{ mm}$$

Výpočet 5.4 představuje odchylku polohy kamery od definované polohy vlivem teplotní dilatace. Ve výpočtu je uvažováno ocelové vedení. Mezi počáteční a koncovou polohou vedení vzniká rozdíl v řádech desetin mm. Odchylka vzniklá teplotní dilatací je úměrná vzdálenosti od počáteční nulové polohy. Kromě teplotní dilatace vedení dochází k dilataci ocelové stropní konstrukce

$$l_{0y} = 8000 \text{ mm}, l_{0x} = 5000 \text{ mm}, l_{0z} = 2000 \text{ mm},$$

$$\alpha_{ocel} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \Delta t = 5$$

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

$$l_y = 8 \cdot (1 + 23 \cdot 10^{-6} \cdot 5)$$

$$l_y = 8,00092 \text{ m}$$

(5.5)

$$\Delta l = l - l_0$$

$$\Delta l_x = 0,575 \text{ mm}$$

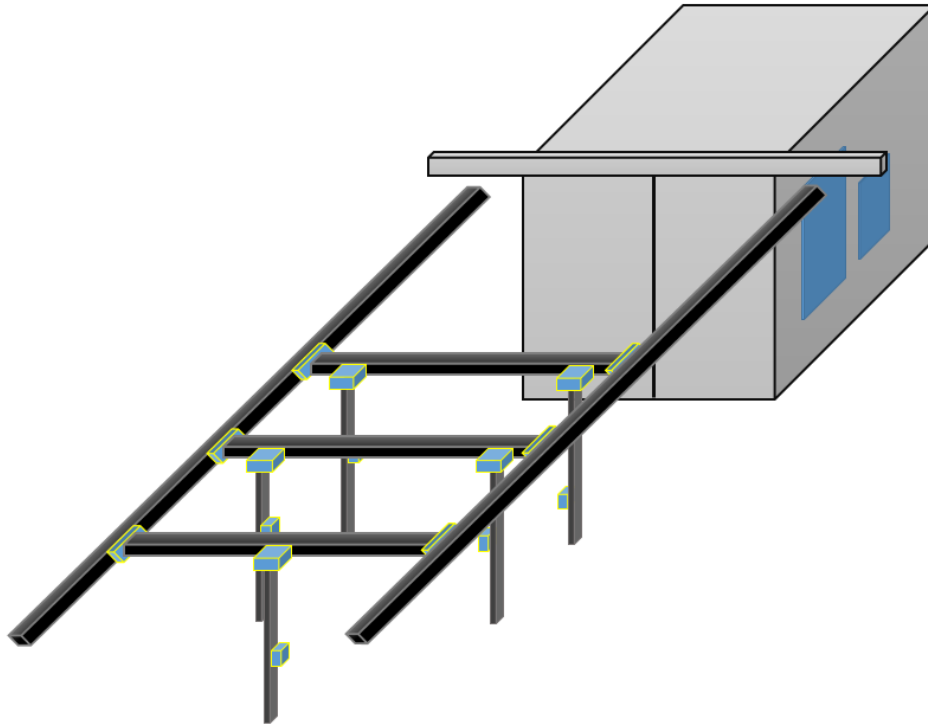
$$\Delta l_y = 0,92 \text{ mm}$$

$$\Delta l_z = 0,23 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{celkove} = \sqrt{(\Delta l_x)^2 + (\Delta l_y)^2 + (\Delta l_z)^2} = 1,1 \text{ mm}$$

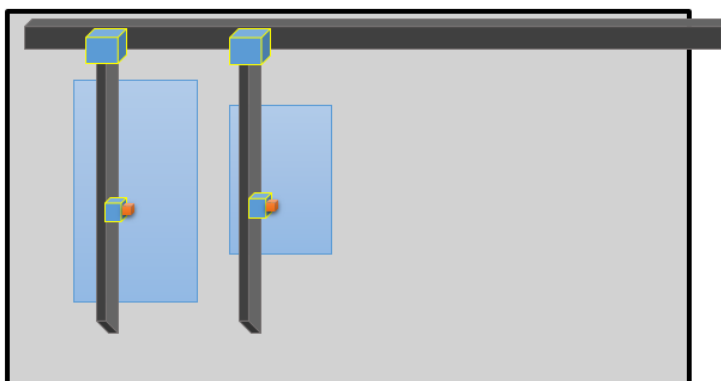


Výpočet 5.5 obdobně jako 5.4 představuje teplotní prodloužení lineárního vedení. Pro odlehčení konstrukce je proveden výpočet i s duralovým lineárním vedením. Duralová konstrukce by byla přibližně 2,8 krát lehčí než ocelová. Dural má ovšem skoro dvojnásobné prodloužení. V koncových polohách by byla kamera vychýlena vlivem působení tepla na vedení o 1,1 mm od přesné polohy.



**Obrázek 5.8:** Návrh podoby systému před komorou.

Polohování kamer v oblasti jedna by bylo založeno na podobném principu, ale jednodušší je pohyb v ose  $X$ . Rovnoběžně s osou  $Y$  by bylo nataženo vedení zavěšené ke stropní konstrukci do potřebné  $X$  souřadnice. Vertikální pohyb by byl realizován obdobně jako je v oblasti před klimatickou komorou.



**Obrázek 5.9:** Návrh podoby systému vedle komory.

Úhly kamer by byly laděny ručně obsluhou. Další možností by bylo vytvoření nosiče kamer, který by například pomocí servopohonů nastavoval úhel automaticky. Ruční ladění úhlů by prodloužilo čas ladění, ale snížilo cenu komponent. Současně by došlo i k zjednodušení řídicího systému.

Na schématech 5.9 a 5.8 je návrh portálového systému. Základní část tvoří dvě podélné kolejnice. Po těchto kolejnicích se pohybují příčné kolejnice. Modré členy znázorňují pohybové motorové jednotky. Výše zmíněnou konstrukcí je zajištěn pohyb ve dvou osách. Vertikální pohyb zajišťují lineární posuvy připevněné k vozíkům na příčných kolejích. Z toho plynou následující omezení. Prostor je možné snímat 5 kamerami ze 3 libovolných pozic na podélných kolejích. Kamery nelze zarovnat do jedné linie a je nutné dodržet jejich pořadí. Pokud by byla potřeba více úrovní na podélné kolejnici. Možností by bylo přidat příčné tratě. Celý systém je možné zavěsit na stropní konstrukci. Během nečinnosti lze přesunout ramena do bezpečnější pozice, kde nehrozí poškození.

Návrh 1	Opakov.	Rychlost	Rozsah	Cena	Automatizace	Prostor	Celkem
Body 1-3	2	2	3	2	2	2	13

**Tabulka 5.1:** Hodnocení návrhu s jeřábovými komponentami

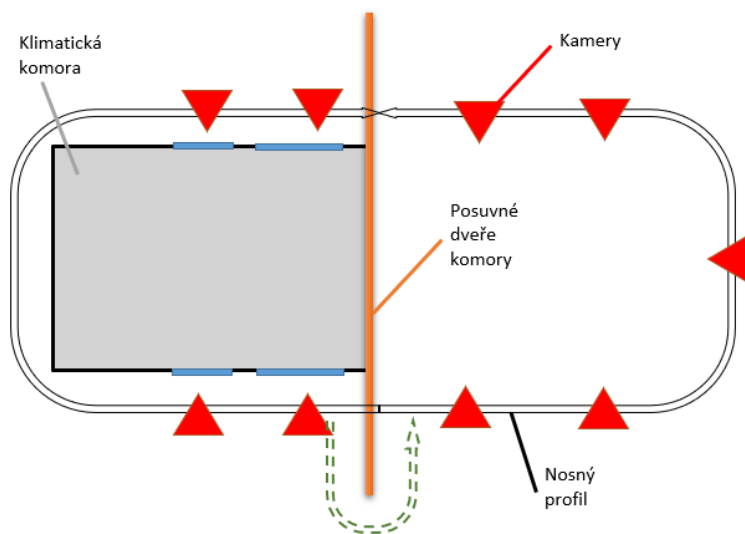
### ■ 5.2.2 Návrh 2

Tento návrh je inspirován a podvěsnými dopravníky. Jednodráhové podvěsné dopravníky se používají při hromadné výrobě, kde zajišťují plynulý pohyb dílů po lince. Jednodráhové jsou proto, že neumožňují změny koleje. Podobně jako u jeřábových systémů je i zde možné volit z širokého intervalu nosností od jednotek do stovek *kg*.

Dopravník funguje na bázi uzavřeného obvodu nosného profilu (dráhy),

na které se drží a pohybují vozíčky. Většina dopravníků má centralizovaný pohyb. Tedy po dráze cirkuluje danou rychlostí řetěz, či jiné medium. Pohyb vozíků je tedy zajištěn unášecími členy (háky, třecí,...). Jednotlivé vozíky lze ovládat postupným připojováním. Vždy by se pohyboval pouze jeden vozík po nelineární trajektorii.

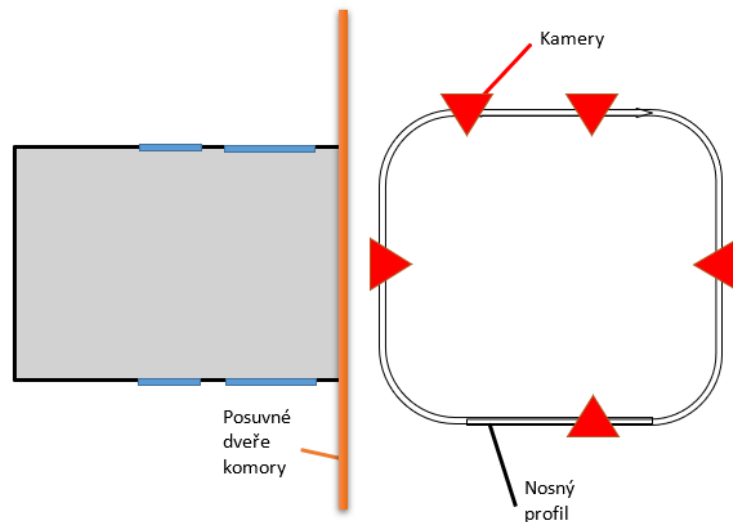
Trajektorie pohybu je pevně stanovena profily a nemusí být striktně lineární. Díky možnosti nelineárního vedení by bylo možné vytvořit Uzávěřený zaoblený obdélník kolem snímaných oblastí.



**Obrázek 5.10:** Návrh dopravníkového vedení kolem obou oblastí.

Na obrázku 5.10 je vyznačená dráha dopravníku. Už z prvního pohledu je patrné, že dráha dopravníku se setkává s dráhou pohybu a mechanismem otvírání dveří komory. Dráhu nosného profilu nelze vést pod ani nad vedením dveří díky vzniku kolizí.

Jedinou možností, kudy by vedení mohlo vést, aby se nedostalo do kolize s mechanismem dveří, je vyznačena zeleně. Musela by vést kolem prostoru, kam se otevírají dveře. Zde však narážíme na technologický problém, kterým je minimální rádius devadesáti stupňové zatáčky. Při použití minimálního rádiusu se dráha nestihne vrátit zpět do pozice u oken.



**Obrázek 5.11:** Návrh dopravníkového vedení kolem oblasti před komorou.

Nastavování polohy vozíku může využívat standardní centrální pohyb. U nosné vedoucí dráhy bude druhý profil, ve kterém bude cirkulovat pohyblivé médium. Rychlost a směr pohybu lze plynule regulovat pomocí frekvenčního měniče. Vozíky se mohou pomocí připojovacího mechanismu připojovat a odpojovat. Dráhu by bylo nutné vybavit senzory, které by udávaly zpětnou vazbu o polohách vozíků. V pojezdovém profilu mohou být umístěny silové a komunikační troleje, kterými mohou být napájeny a řízeny polohovací prvky.



**Obrázek 5.12:** Nelineární hřeben umožňující přesný pohyb vozíků po vedení[33]

Dráha dopravníku na obrázku 5.11 sice neumožňuje pohyb kamer do prostorů vedle zkušebny, ale zajišťuje pohyb kamer i do prostoru před dveřmi. Další možností pohybu vozíků je osazení nosného vedení hřebenem viz obrázek 5.12.

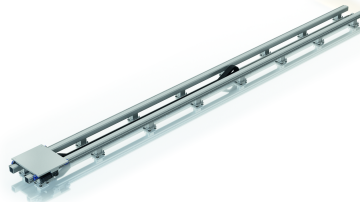
Po takovémto vedení by se řízeně pohybovaly vozíky osazené motory se senzorem pohybu. Nevýhodou tohoto řešení je omezený pohyb v osách  $X$  a  $Y$  daný polohou vedení. Osa  $Z$  by byla řešena lineárním pohonem umístěným pevně ve vozíku. Kamery by byly umístěné na držácích umožňující rotační pohyb kolem os  $Y$  a  $Z$ . Nastavení úhlů by mohlo být nastavováno automaticky nebo manuálně obsluhou.





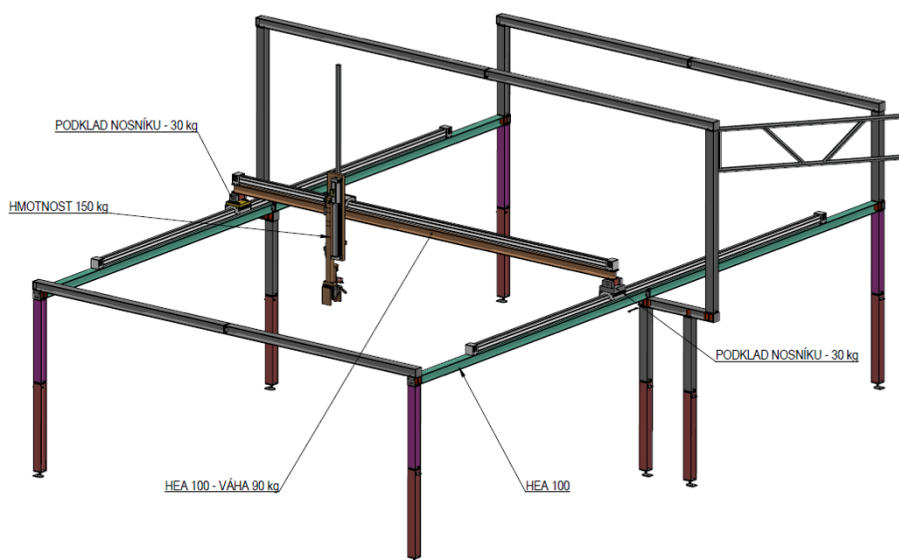
**Obrázek 5.13:** Rameno manipulátoru a posuvem vhodným pro přesné polohování kamer FLT [34].

Na jednu nosnou dráhu lze umístit více jezdců, které lze samostatně ovládat bez vlivu na ostatní. Všechny jezdce jsou vybaveni motorem a senzory, díky kterým je zajištěno přesné polohování s opakovatelností  $\pm 0,02 \text{ mm}$ . Nosnou konstrukci je možné stabilně umístit na sloupy nebo zavěsit na existující stropní konstrukci. Existuje zde i možnost pozemního vedení, které by bylo pevně připevněno do podlahy zkušebny.

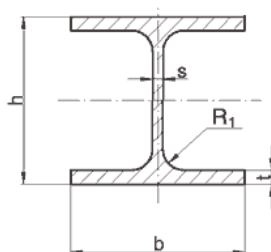


**Obrázek 5.14:** Pozemní vedení [34].

Uložení vedení do úrovně podlahy přináší problémy při výměně zkušebních sestav. V levé straně prostoru před klimatickou komorou je nutné zajistit podlahu bez výstupků. Pro závěsné a sloupové řešení nastává problém ve střední části snímané oblasti. Posuv v ose  $Z$  se provádí celým vedením. Horní část vedení se dostává do kontaktu s ventilačním systémem. Pro aplikaci tohoto systému by bylo nutné předělat ventilační a osvětlovací systém, tak aby umožnil vzestup  $Z$  vedení.



**Obrázek 5.15:** Možná podoba tříosého polohovacího systému v případě, kdy by došlo k posunutí ventilace a osvětlení.



**Obrázek 5.16:** Rozměry nosníků HAE100 [33]

Rozměry nosníku *HEA100* z obrázku 5.16 jsou následující:  $h = 96 \text{ mm}$ ,  $b = 100 \text{ mm}$ ,  $s = 5 \text{ mm}$ ,  $t = 8 \text{ mm}$  a  $R_1 = 12 \text{ mm}$ . Hmotnost profilu je  $16,7 \text{ kg/m}$  a kvadratický moment k ose je roven  $2337356,7 \text{ mm}^4$ . Mezní úchytky profilu jsou dle *EN 10034* v řádech jednotek *mm* a to do systému již vnáší nepřesnosti. U nosníků je nutné uvažovat i vliv teploty a průhyby vzniklé zatížením i vlastní vahou. Průhyb profilu způsobený jeho vlastní hmotností je následující: Kvadratický moment průřezu  $J = 834229,2 \text{ mm}^4$ ; spojité zatížení  $f = 0,655 \text{ kN/m}$ ; modul pružnosti v tahu  $E = 210 \text{ Gpa}$ ; délka nosník  $l = 4000 \text{ mm}$ ;  $F = 1,471 \text{ kN}$ , která odpovídá zatížení  $150 \text{ kg}$ .

$$X_r = \frac{5 \cdot f \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot J}$$

$$X_r = 12,46 \text{ mm}$$

$$X_h = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J} \text{ [mm]} \quad (5.6)$$

$$X_h = 11,2 \text{ mm}$$

$$X_c = X_r + X_h = 23,7 \text{ mm}$$

Ve výpočtu 5.6 je stanovován maximální průhyb nosníku  $X_c$  v modelové situaci staticky určitého nosníku na dvou podpěrách. Průhyb  $X_r$  je dán vlivem zatížení v podobě spojitě síly a pro  $X_h$  je zatížením osamělá síla  $Z$  vedení působící v polovině vedení.

Výpočty jsou orientační a slouží pouze k demonstraci vlivu průhybu na vychýlení kamery. Obdobně jsou na tom i výrobní nepřesnosti nosníků a teplotní dilatace. Přesný manipulátor s opakovatelností pohybu v desetínách milimetru by na takovém vedení vykazoval řádově větší odchylky. Většina těchto nepřesností vzniká systematicky a bylo by možné je odstranit kalibrací systému. Kalibrace průhybu by například přizpůsobovala  $Z$  souřadnici dle známé hodnoty průhybu v dané pozici.

Návrh 3	Opakov.	Rychlost	Rozsah	Cena	Automatizace	Prostor	Celkem
Body 1-3	3	3	2	1	3	1	13

**Tabulka 5.3:** Hodnocení návrhu s manipulátory

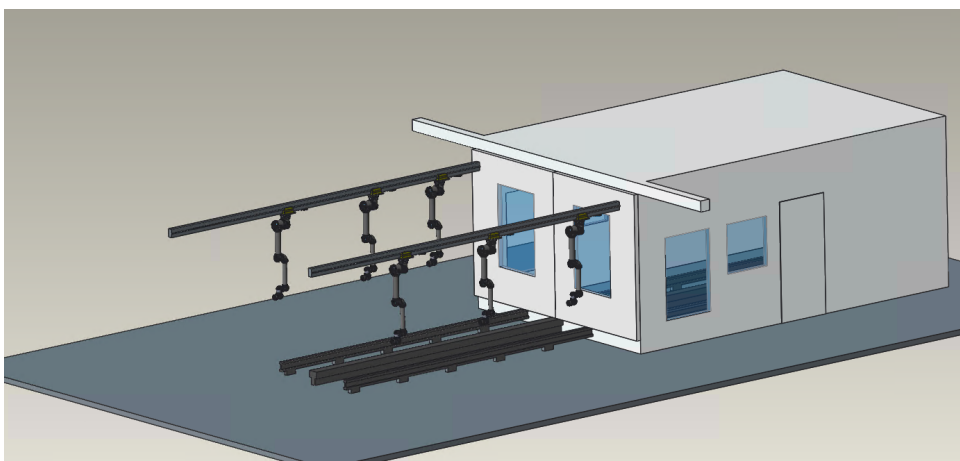
## 5.2.4 Návrh 4

Zajímavou možností polohování kamer v trojrozměrném prostoru je využití robotických ramen. Robotické rameno je programovatelný stroj používaný k provádění různých úkolů přesným způsobem a s velkou výdrží. Velkou předností robotických ramen je široká škála pohybu. Robotická ramena mají několik kloubů a aktuátorů, které umožňují tento pohyb.

Možný pohyb robotických ramen definuje stupeň volnosti, rozsah otáčení každého kloubu a rozsah práce v dvourozměrné a trojrozměrné rovině. Pohyb lze určit rotací nebo posunutím v dvourozměrném nebo trojrozměrném prostoru. Pohyb posunutí určuje schopnost kloubu pohybovat se dopředu a dozadu. Tyto parametry závisí na typu použité mechanického ramene. Na konci ramene je koncový efektor. Koncový efektor je navržen pro interakci s prostředím a je také řízen servomotory. V případě polohovacího systému je to držák kamery.







**Obrázek 5.18:** Robotická ramena na závěsném vedení

Pohyb robotických ramen je možné zajistit umístěním na pohyblivé vozíčky. Vozíčky se pohybují po nosných kolejnicích. Nosné kolejnice mohou být připevněné k podlaze nebo ke stropní konstrukci. Na obrázku 5.18 je vidět návrh podoby zkušebny s polohovacím kamerovým systémem. Polohování je zajištěno pohyblivě zavěšenými robotickými rameny.

Pro zavěšená ramena je možné nastavit kamery do libovolné pozice v oblasti odpovídající cca třem čtvrtinám válce o poloměru délky ramene. Osa válce je totožná s vedením. Ve snímané oblasti před komorou by toto řešení vyřešilo polohování kamer v blízkosti vedení. Vedení ve výšce 2500 mm umožňuje nejnižší možnou polohu kamery cca 1600 mm nad podlahou. Požadavek na nejnižší uložení kamery je však 400 mm nad podlahou.

Dosažitelné polohy kamery zavěšené na stropním vedení jsou omezené. Omezení se hlavně projevuje ve spodní části prostoru, kam již rameno nedosáhne. V případě uložení vedení na podlahu je docíleno opačné situace. Dosah ramene umožňuje polohování kamery od podlahy do cca 1000 mm nad podlahu. Přidáním distančního členu mezi pohyblivý vozík a základnu ramena lze zvýšit dosah. Je-li vedení ve výšce 200 mm nad úroveň podlahy a vozíček včetně distančního členu vysoký 900 mm poté je základna robotického ramena ve výšce 1200 mm. S délkou ramene 850 mm je dosažitelná válcová oblast položena nejnižší v 350 mm a nejvyšším bodem je 2050 mm.

Teoretické opakovatelné dosažení polohy je dáno součtem opakovatelnosti robotického ramene a lineárního posuvu a nepřesahuje  $\pm 0,1$  mm.

Uložení robotických ramen na nosné vedení na zemi sníží manipulační prostor pro přepravu zkoušených sestav. Pevné vedení tvoří pro zkoušenou sestavu nepřekonatelnou bariéru. Výhodnější uložení bude použití závěsného vedení s distančními prvky. Výhody plně automatizovaného systému umožňují přesné dosažení polohy bez nutnosti ručního mechanického nastavování, dále nezasahují do podlahy, která zůstává bez překážek. Vedení musí být opatřeno

i vedením pro napájecí a řídicí kabeláž, která bude značná. Další možností je vedení řídicích kabelů přímo do "velínu" společně s kamerovými vodiči.

Nevýhoda je vyšší cena robotických ramen a vedení. Vedení navíc nutné zakomponovat do nosné konstrukce, což povede na nutné přesunutí již existujících systémů osvětlení a ventilace. Komplikace také nastávají v oblasti vedle klimatické komory. Vedení před a vedle komory není možné propojit. Pro prostor vedle komory by byl vhodnější lineární polohovací systém bez robotických ramen, které by byly použity výhradně v přední části.

Návrh 4	Opakov.	Rychlost	Rozsah	Cena	Automatizace	Prostor	Celkem
Body 1-3	3	3	2	1	3	1	13

**Tabulka 5.4:** Hodnocení návrhu s robotickými rameny na lineárním vedení

### ■ 5.2.5 Návrh 5

Návrh 5 je z části podobný návrhu 4, také využívá robotických ramen. Použitím vysokorychlostní kamer jako efektorů na koncích robotických ramen lze kamery přesně, rychle a efektivně rozmístit do definovaných poloh. Nevýhodou ramen je jejich omezený dosah. V tomto návrhu jsou ramena umístěna staticky na nepohyblivých věžích. Kolem základny robota se tvoří kulový prostor, ve kterém lze kamery téměř libovolně umístit. Základna robota musí být dostatečně těžká, aby odolala klopnému momentu, který způsobuje vychýlení robotické rameno s kamerou.

Statické uložení na podlaze snižuje cenové náklady polohovacího systému a to o cenu úpravy stropní konstrukce nosných vedení, vozíčků a řízení. Zároveň zajišťuje volnou podlahu umožňující přesun zkušebních sestav.

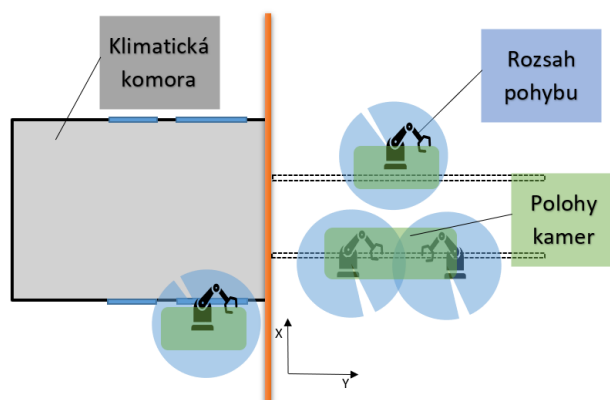


**Obrázek 5.19:** Robotická ramena *Ewellix* umístěná na zvedajícím členu, který rozšiřuje dosah ramene.[35]

Na obrázku 5.19 je zobrazena zkušebna s částí technologické výbavy. Věže tvoří základny robotických ramen. Robotická ramena jsou upevněna k zá-

kladně. Výška základny definuje nejvyšší a nejnižší dosažitelné polohy kamer. Pokud bude základna ve výšce 1200 mm nad úrovní podlahy, teoreticky nejvyšší možná dosažitelná souřadnice v ose  $Z$  bude cca 2000 mm nad úrovní podlahy zkušebny. Vyvýšené usazení robota zvyšuje dosah ramene. Kameru tak lze umístit vysoko do prostoru nad plochu základny i do úrovně pod ní.

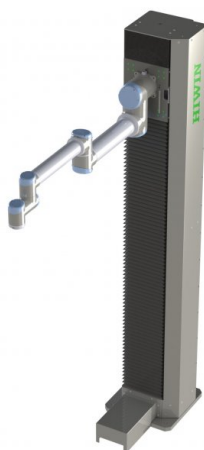
Věž s robotickým ramenem představuje plně funkční a samostatnou jednotku. Pozice jednotek a výšky věží je nutné optimalizovat na základě požadavků na pozice kamer ve zkušebně.



**Obrázek 5.20:** Schéma zkušebny s názorným umístěním polohovacích jednotek

Uložení věží na podlaze by nemělo bránit pohybu zkušebních celků ve zkušebně. Pokud by některá z věží bránila pohybu, měla by být snadno demontovatelná, aby bylo možné v případě potřeby s jednotkou uhnout.

Obdobný důraz je kladen na přesnou pozici umístění věže. Pozice věží na podlaze by měla být přesně daná a snadno nastavitelná. Například pomocí značek a dorazů, které by umožňovaly jednoduchou instalaci. Značky a dorazy by měly být pevné a neměnné, dále nesmí samy tvořit bariéru zkoušeným sestavám. Dále by měly zaručit jednoznačné umístění a orientaci věže s robotickým ramenem.



**Obrázek 5.21:** Věž s vertikálním lineárním pojezdem a robotickou rukou[36].

Vertikální pojezdové dráhy RX jsou poháněny pomocí ozubeného řemene a jsou primárně určeny pro polohování ve svislém směru, s kolaborativními roboty do celkové hmotnosti 50 kg a maximální výšky zdvihu 3 m. Jejich konstrukce odpovídá použití v prostředí, kde se při práci setkává člověk s robotem.[36]

Výška věží může být pevná nebo nastavitelná. Nastavitelná výška základny robotického ramena rozšiřuje dosažitelný prostor v ose  $Z$ . Věže musí být dostatečně stabilní, aby setrávaly v klidu i v případě dynamických rázů vzniklých pohybem ramene. Základna věže musí být dostatečně široká, tak aby nedošlo k jejímu překlopení vlivem klopného momentu vyoseného ramene.

Systém je částečně automatizovaný. Robotická ramena automaticky nastavují polohy kamer, nejprve je ale nutné manuálně nastavit pozice nosných věží. V tomto případě je částečná automatizace výhodou, umožňuje téměř libovolné umístění věží v případě, kdy nastane nestandardní požadavek na pozice kamery. Stačí pouze přesunout věž na potřebné místo bez nutnosti složité demontáže.

Návrh 5	Opakov.	Rychlost	Rozsah	Cena	Automatizace	Prostor	Celkem
Body 1-3	2	3	3	2	2	3	15

**Tabulka 5.5:** Hodnocení návrhu s robotickými rameny na statických platformách

## ■ 5.2.6 Návrh 6

V případě, kdy by byl požadován plně automatický systém, lze návrh 5 plně automatizovat. Manuální nastavování pozic věží s robotickými rameny lze eliminovat. Místo statických věží budou pohyblivé mobilní věže. Robotická ramena mohou být na pojízdných automaticky naváděných vozidlech s pevnou nebo nastavitelnou výškou platformy.

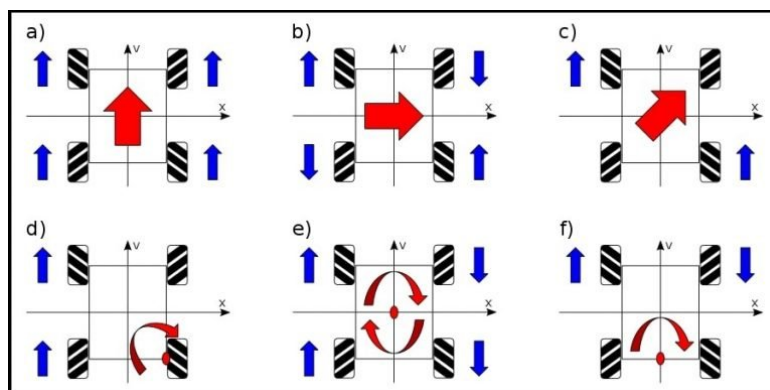


**Obrázek 5.22:** Ukázka pohyblivé věže s robotickým ramenem [37].

Automaticky naváděná vozidla jsou široce používána ve výrobních linkách, ale spoléhají na pevnou trajektorii. Mobilní roboti jsou inteligentní pohyblivé plošiny, používané k dopravě materiálů pomocí automatické navigace. Mobilní roboti jsou široce používány pro flexibilní výrobní systémy, inteligentní továrny, automatizované sklady, logistické systémy a další.

Robotická vozidla často využívají otevřenou a modulární architekturu, která usnadňuje úpravy, údržbu a upgrady. Některé vozidla jsou osazena dotykovou obrazovkou, která se používá k interakci člověk-počítač, takže ji lze použít jako platformu pro vkládání příkazů a úprav.

Většina současných běžných mobilních dopravních platforem využívá jednoduchý diferenciální pohyb se dvěma hnacími koly, existují však také i další platformy používající všesměrová kola *Mecanum*. Příkladem platformy s *Mecanum* koly může být *OmniRob* společnosti *KUKA*. *OmniRob* je vnitřní přepravní platforma s vnitřní autonomní navigací a všesměrovými mobilními schopnostmi.



**Obrázek 5.23:** Možnosti pohybu všesměrového kola [38].

Navigace mobilních platforem uvnitř budov může být realizována různými způsoby. Trajektorie pohybu vozidla může být značena pozemními magnetickými proužky, které robotická vozidla sledují. Některá vozidla jsou vybaveny laserovými radary, pomocí kterých se mohou flexibilně pohybovat úzkým prostorem. Část robotických vozidel využívá k navigaci kamerové systémy. Kamerové senzory snímají okolí a vizuálně vyhodnocují svou aktuální pozici. Na podlahy se například kreslí orientační sítě, které slouží k vizuálnímu vyhodnocení polohy.

Směr	Vzdálenost [m]					Odchylna	
	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	Průměr [cm]	Rozptyl [cm <sup>2</sup> ]
↑	0.2	-0.3	0.1	0.1	0.2	0.06	0.043
↓	-0.3	0.1	-0.2	0.1	-0.1	-0.08	0.032
←	0.2	-0.1	0.1	-0.2	0.3	0.06	0.043
→	0.1	-0.3	0.2	0.1	-0.2	-0.02	0.047
↖	0.3	-0.2	-0.4	0.2	0.4	0.06	0.118
↗	-0.1	0.1	0.3	-0.3	0.3	0.06	0.068
↙	0.3	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.02	0.097
↘	-0.3	0.2	0.1	-0.1	0.3	0.04	0.058

**Obrázek 5.24:** Měření odchylek polohy na přímé dráze v závislosti na ujeté vzdálenosti [39].

Na obrázku 5.24 jsou zobrazené hodnoty odchylek skutečné polohy automaticky naváděného robota. Navigace je realizována vizuálně kamerou. Kamera snímá podlahu, na které je nakreslena lineární dráha, která určuje trajektorii pohybu.

Opakovatelnost a rychlost závisí na konkrétním typu automaticky naváděného vozítka a typu navigace. Opakovatelnost najetí pozice v ose  $X$  a  $Y$  pro navigační systémy sledující například magnetický pásek do velké míry závisí na celkové vzdálenosti a počátečních podmínkách (jak přesně je na počátku pohybu umístěn), které musí vozítko překonat. U laserově naváděných vozidel je opakovatelnost až  $\pm 10$  mm. Rychlosti pohybu jsou také různé, nejčastěji se ohybují od 5 - 48 m/min.

Podlaha zkušebny je hladká a umožňuje nakreslení vodících navigačních značek. Každý vozík může mít svou vlastní trajektorii pohybu. Pro vozíky je také možné nastavit nulovou (počáteční) pozici, do které mohou jednotky v době nečinnosti odjet. Výhodou tohoto návrhu je možnost snadno přidávat nové jednotky pro polohování více kamer.

Návrh 6	Opakov.	Rychlost	Rozsah	Cena	Automatizace	Prostor	Celkem
Body 1-3	2	3	3	1	3	3	15

**Tabulka 5.6:** Hodnocení návrhu s robotickými rameny na mobilních platformách

### 5.2.7 Návrh 7

Další možností, jak lze polohovat kamery je použití drobnějších lineárních modulů. Lineární modul je kompaktní jednotka, která obsahuje kombinaci lineárního vedení a pohonného elementu v tuhém extrudovaném profilu. Lineární moduly mohou být poháněny ozubeným řemenem, hřebenem a pastorkem dále pak kuličkovým nebo trapézovým šroubem a nebo lineárním motorem. Jako vodící systém je použito kuličkové lineární vedení nebo kladičkové vedení.



**Obrázek 5.25:** Tříosý lineární polohovací systém umístěný na podlaze zkušebny.

Základní profil je vždy konstruován s ohledem na vysokou tuhost. V případě kuličkového lineárního vedení je profilová kolejnice přišroubována do profilu, v případě kladičkového vedení jsou kalené tyče (dráhy) integrovány do profilu. Jezdec (pohybový stůl) je komplexní sestava, kde jsou namontovány vozíky lineárního vedení nebo kladičky. Kromě toho tento jezdec spojuje pohonné prvky s vodícími prvky lineární osy. Sestava lineárních modulů tak spolehlivě zajišťuje přesný pohyb kamer v osách  $X$ ,  $Y$  a  $Z$ . Délky os jsou volitelné.

Opakovatelnost poloh je u lineárních posuvů v řádech setin  $mm$  v závislosti na konkrétním typu zařízení. Řemenové lineární pojezdy mají opakovatelnost  $0,05\ mm$  a šroubové  $0,03\ mm$ . Rychlost pohybu lze regulovat, maximální rychlost může být až  $15\ m/s$ . Délky mohou být od jednotek milimetrů až po tisíce milimetrů.

Nastavování úhlů kamery je možné provádět mechanicky pomocí aretačních členů nebo automaticky. Automatické nastavování by měl na starost kamerový nosič. Kamerový nosič by byl upevněn na konci lineárních vedení jako efektor.



Naklápění kamer může být zajištěno například dvojicí servopohonů.



**Obrázek 5.26:** Příklad manuálně ovládaného víceosého rotačního systému [40].

Všechny dosažitelné polohy jedné kamery umístěné na polohovací jednotce jsou omezeny délkou vedení a polohou základny. Rozsah pohybu jednotky je v tomto případě obdélník. Podobně jako na schématu 5.20. Podobně jako v návrhu číslo 5 lze omezený rozsah kompenzovat uložení na statické věže, které lze umístit na téměř libovolně souřadnice zkušebny  $X$  a  $Y$ .

Statické pozice věží je nutné optimalizovat, tak aby se možné dosažitelné polohy kamer co nejvíce shodovaly s potřebnou polohou kamer. U statických platform je nutné zajistit, aby byla pozice věže ve zkušebně dosažena s vysokou opakovatelností. Součástí věží by mohla být i řídicí jednotka robotů a pohyblivých platform, do které by byly přivedené kabely pro řízení. Tato řídicí jednotka by byla dále propojena s "velínem" aktivačních zkoušek.

Návrh 7	Opakov.	Rychlost	Rozsah	Cena	Automatizace	Prostor	Celkem
Body 1-3	2	3	3	3	2	3	16

**Tabulka 5.7:** Hodnocení návrhu s lineárními posuvy na statických platformách

### 5.3 Vyhodnocení návrhů

Představené návrhy různými způsoby zajišťují polohování kamer uvnitř zkušební laboratoře před a vedle klimatické komory. Jednotlivé návrhy se liší v mnoha ohledech.

Pro jejich hodnocení byly stanoveny klíčové sledované parametry. Detailní popis parametrů je napsán na začátku této kapitoly. Pro připomenutí, sledované parametry jsou opakovatelnost, rychlost, rozsah pohybu, cena, míra automatizace a prostorová náročnost. Systémy jsou hodnoceny formou bodového zisku. Systém se 3 body je vhodnější než s 1 bodem.

V tabulce 5.8 je vidět bodový zisk všech návrhů. Nejméně vhodný je návrh využívající dopravníkové systémy s bodovým ziskem 11 bodů. Insta-

	Popis konstrukce návrhu	Body	Místo
Návrh 7	Lineární posuvy na mobilních/statických platformách	16	1
Návrh 5	Robotická ramena na statických platformách	15	2
Návrh 6	Robotická ramena na mobilních platformách	15	2
Návrh 1	Jeřábové systémy a komponenty	13	3
Návrh 3	Manipulátorové systémy a komponenty	13	3
Návrh 4	Robotické ramena na lineárním vedení	13	3
Návrh 2	Dopravníkové systémy a komponenty	11	4

**Tabulka 5.8:** Celkové umístění jednotlivých návrhů vypovídající o vhodnosti užití

Návrh	1	2	3	4	5	6	7
Opakovatelnost	2	1	3	3	2	2	2
Rychlost	2	2	3	3	3	3	3
Rozsah	3	1	2	2	3	3	3
Cena	2	3	1	1	2	1	3
Automatizace	2	2	3	3	2	3	2
Prostor	2	2	1	1	3	3	3
Celkem	13	11	13	13	15	15	16

**Tabulka 5.9:** Přehled bodových zisků jednotlivých návrhů

lace tohoto systému by obnášela nutné změny v již existující technologii a stropní konstrukci. Rozsah kamer by byl také omezený, systém by navíc nedokázal bez složitého přenastavení snímat aktivaci v obou sledovaných oblastech.

Na třetím místě hodnocení je umístěna trojice návrhů s bodovým ziskem 13 bodů. Tyto návrhy splňují důležité technické požadavky lépe než návrh číslo dva. Všechny tři návrhy umožňují velkou opakovatelnost a rozsah pohybu. Nevýhodou je nutnost instalace pozemního nebo lineárního vedení. Tyto systémy mají vysokou míru automatizace, která je ale zároveň doprovázena vyšší cenou.

U návrhů je možné počítat i s modularitou. V případě potřeby lze již hotový systém rozšířit. Rozšíření systému však povede na velký zásah do celého systému a bylo by výhodné předem se na takové to možnosti připravit.

S bodovým ziskem 15 bodů se umístila dvojice řešení. Tato dvojice vyhovuje potřebám a možnostem zkušebny. Návrhy se skládají ze statických nebo dynamických věží, které slouží jako platformy pro víceosé polohovací zařízení. Tyto věže se umístí do potřebných souřadnic  $X$  a  $Y$  zkušebny. Jako polohovací zařízení jsou k dispozici robotická ramena zajišťující pohyb v osách  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  společně s osami rotace  $\alpha$  a  $\beta$ . Nevýhodou těchto návrhů je vyšší cena komponent.

Optimálním řešením je návrh číslo 7, kde je robotické rameno nahrazené soustavou lineárních pohonů s efektozem zajišťující rotaci kamery. Dosah lineárního vedení je volitelný a odpovídá jeho délce. Pohybový rozsah jednoho stanoviště tedy lze zvolit, na rozdíl od přesně dané délky robotického ramene.



návrh číslo 6 obdobně jako číslo 7 využívá statická stanoviště tentokrát jako platformy pro robotická ramena.

Porovnáním výsledků mého bodového hodnocení, které sloužilo pro mé osobní hodnocení parametrů návrhů a celkovou vhodnost systému, s návrhy vybranými zkušebnou docházíme ke shodě. Podle tabulky 5.8, která zobrazuje pořadí návrhů se návrh číslo 7 umístil na prvním místě a návrh číslo 6 díky vyšší ceně na místě druhém.

Dvojice vybraných návrhů zajišťuje stanovenou opakovatelnost a nastavitelnou rychlost nastavování kamer. Nezávislost jednotlivých funkčních sestav (platforma s víceosým polohovacím systémem) umožňuje téměř libovolné rozšíření systému o další kamerové stanoviště, kdy rozsah pohybu odpovídá délkám lineárních posuvů.

Výhodnost modularity je patrná i v případě poruchy nebo údržby zařízení. Dojde-li na jednom z funkčních celků k poruše je tento celek vyřazen. Na ostatní funkční celky to však nemá žádný vliv a jsou stále provozuschopné. Poškozený celek lze z jeho definované pozice odstranit a na dobu opravy nahradit například stativem.

Podobná situace nastává i v případě pravidelné údržby, která je snáze proveditelná na modulárních zařízeních.

Jedním z důvodů, který přispěl k vyhodnocení návrhů číslo 6 a 7 jako nejvhodnější je téměř nulový zásah do aktuálního stavu zkušebny. Instalací polohovacích kamerového systému dle návrhů 6 a 7 nevznikají žádné pevné bariéry v celém prostoru zkušebny. Podlaha tedy zůstává volná pro přepravu zkušebních celků. Obdobně zůstává zachována i stropní konstrukce, ke které jsou připevněny osvětlovací prvky a digestoř. Celá již existující technologie ve zkušebně může dále pracovat bez nutnosti změn.

Dosavadní rozsah návrhů sloužil pouze k ilustrativní demonstraci možností technického provedení kamerového systému. Vybráním konkrétního návrhu je zvolený směr dalšího navrhování. Následující části budou více zaměřeny na konstrukční činnost, na konci kterých bude zvolený návrh číslo 7 dopracován a navržen do instalovatelné podoby.

## Kapitola 6

### Konstrukce kamerového polohovacího systému dle návrhu 7

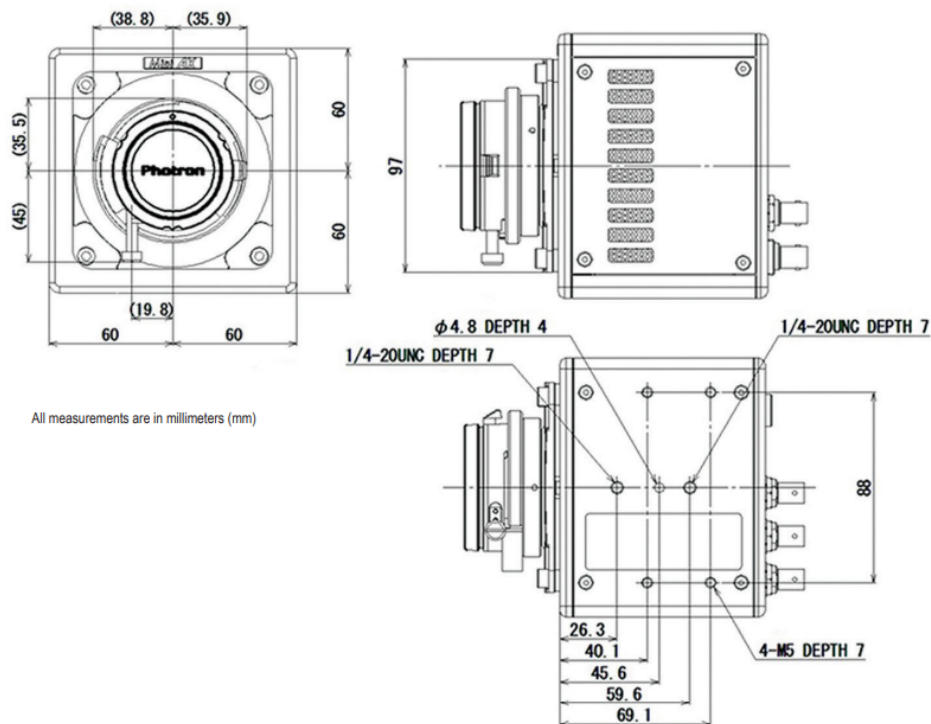
Konstrukci polohovacího kamerového systému podle návrhu číslo 7 rozdělím na několik dílčích částí. Systém se skládá z nosné platformy, které budou společně s optimalizací polohy tvořit první část konstrukce. Dalším prvkem jsou lineární polohovací moduly zajišťující pohyb kamery v osách  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Posledním prvkem jsou supporty zajišťující uložení efektoru (vysokorychlostní kamery) a rotaci ve dvou osách danou úhly  $\alpha$  a  $\beta$ .

Konstrukce jednotky polohovacího kamerového systému postupuje od nosiče vysokorychlostní kamery a dvouosého rotačního mechanismu níže k lineárním modulům. Tento směr návrhu je nutný z hlediska silových poměrů a nároků kladených na komponenty. Po návrhu pohyblivých částí přijde na řadu konstrukce nosné platformy. Nosná platforma musí tvořit stabilní základnu pro pohybové moduly.

#### 6.1 Uložení efektoru a jeho rotace

Koncovým členem celého polohovacího systému je vysokorychlostní kamera *FASTCAM Mini AX200*. Cílem mechanismu je pohybovat kamerou v pěti osách s vysokou opakovatelností a přesností. Vysokorychlostní kamera je citlivé zařízení a z toho důvodu je nutné omezit možné přetížení, které vzniká pohybem mechanismus, tak aby se předešlo poškození. Maximální možné přetížení je rovné síle  $100 G$  působící po dobu  $10 ms$ .

K vysokorychlostní kameře náleží také vyměnitelný objektiv, jehož vyměnitelnost by měla zůstat zachována ve stavu, kdy je kamera umístěna v polohovacím systému. Objektiv je připevněn k tělu kamery pomocí *C-mount* s možností různých redukci. Hmotnost kamery je  $1,5 kg$ , hmotnosti objektivů se pohybují do  $0,5 kg$  včetně redukčních kroužků v případě potřeby. Silové účinky působící při výměně objektivu jsou běžné, jako například u fotoaparátových objektivů. Celková hmotnost kamery a jejího příslušenství včetně kabelů nepřekročí hmotnost  $4 kg$ . Pro případ výměny kamer je v následujících konstrukčních částech kalkulováno s hmotností efektoru  $5 kg$ .



Obrázek 6.1: Rozměry vysokorychlostní kamery FASTCAM Mini AX200

$$F = m \cdot g \quad (6.1)$$

$$F = 5 \cdot 9,81 = 49,05N$$

$$J = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (b^2 + a^2) \quad (6.2)$$

$$J = \frac{1}{12} \cdot 5 \cdot (0,12^2 + 0,094^2) = 9,68 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Tíhová síla kamery  $F$  je vypočítána v rovnici 6.1, kde  $m$  je hmotnost kamery a  $g$  je gravitační zrychlení. V rovnici 6.2 je vypočítán moment setrvačnosti  $J$  k ose otáčení úhlu  $\alpha$  tj. k normále od středu kamery, kde  $a$  a  $b$  jsou rozměry kamery. [41]

Kameru je nutné pevně připevnit ke koncovému členu mechanismu, aby během nastavování polohy nedocházelo k jejímu pohybu. Za tímto účelem jsou na spodní a horní straně kamery sady závitových děr. Dvojice děr se závitem 1/4-20 UNC je na spodní i horní straně a čtyři závitové díry s metrickým závitem M5 na straně spodní.

Spojení kamery s nosičem je realizováno šroubovým spojením. Pro minimalizování hmotnosti soustavy je kamera připojena k nosiči pouze na horní

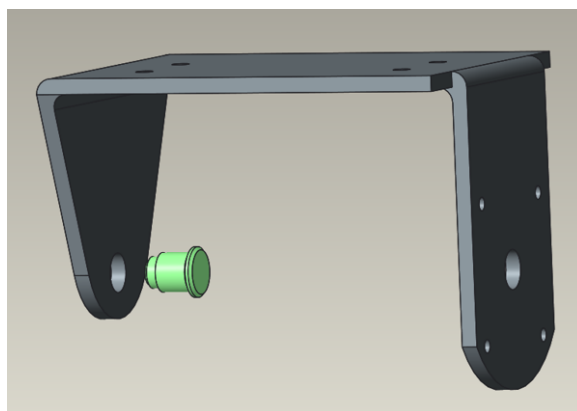
straně čtyřmi *M5* šrouby. Čtveřice šroubů zajišťuje dostatečně robustní spoj, který je schopný kameru udržet.

### 6.1.1 Nosič kamery

Nosič kamery je vyroben ze slitiny hliníku *AlCuMg* také označované jako dural. Normované označení slitiny je *EN AW 2017 T6*. Dural se vyznačuje velmi dobrou pevností začínající na *350 MPa*, nadprůměrnou tvrdostí *105 HBW* a hustotou *2800 kg/m<sup>3</sup>* za standardních podmínek.

Kamerové lože musí být uloženo tak, aby se mohlo otáčet kolem jedné osy. Pomocí tohoto pohybu bude nastavován zorný úhel kamery  $\alpha$  (natačení kamery nahoru a dolů). Lože je z levé strany pevně připevněno šroubovým spojem k přesně polohovatelné rotační platformě. Rotační platforma má omezenou nosnost a v případě, kdy by kamera byla připevněna pouze k rotační platformě, hmotnost kamery by zatěžovala momentem platformu. Tento moment by páčil rotační mechanismus a mohlo by dojít k jeho poškození. Zároveň by mohlo docházet k naklápění kamery, což by vedlo k nežádoucímu pootočení obrazu.

Eliminace nežádoucích sil, působících na platformu, je dosažena dodatečnou vazbou na pravé straně lože. Eliminací sil se sníží namáhání rotačního mechanismu. Tato vazba musí být rotační, aby umožnila rotaci kamery. Rotační vazba je uskutečněna čepem a ložiskem, které zajišťují hladší průběh rotačního pohybu. Lepší montáž a ochranu kamery zajistí otočení kamerového lože o  $180^\circ$ . Kamera se z vrchu připojí pomocí čtyř šroubů. Duralová deska na horní straně kryje vysokorychlostní kameru před poškozením.



Obrázek 6.2: Kamerové lože s čepem pro podepření.

$$m = \rho \cdot V$$

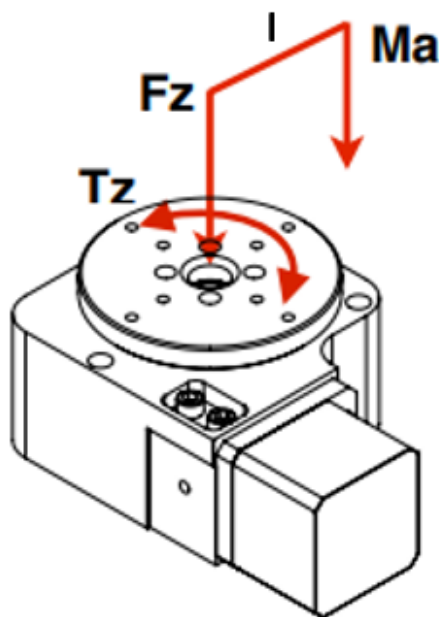
$$m = 2800 \cdot 115777 \cdot 10^{-9} \quad (6.3)$$

$$m = 0,324 \text{ kg}$$

Hmotnost kamerového lože je  $0,287 \text{ kg}$ , hmotnost je vypočítána ze známé hustoty duralu a objemu  $102358 \text{ mm}^3$ . Objem je stanoven z modelovacího programu *Creo*.

### 6.1.2 Rotační manipulátory úhlů $\alpha$ a $\beta$

Přesné nastavení úhlů kamery je jedním ze základních požadavků na polohovací kamerový systém. Za tímto účelem jsem vybral přesné rotační moduly *RM-3 Neumark*. Parametry tohoto zařízení vyhovují požadavkům i s ohledem na možné změny.



**Obrázek 6.3:** Síly působící na rotační manipulátor RM-3 [40].

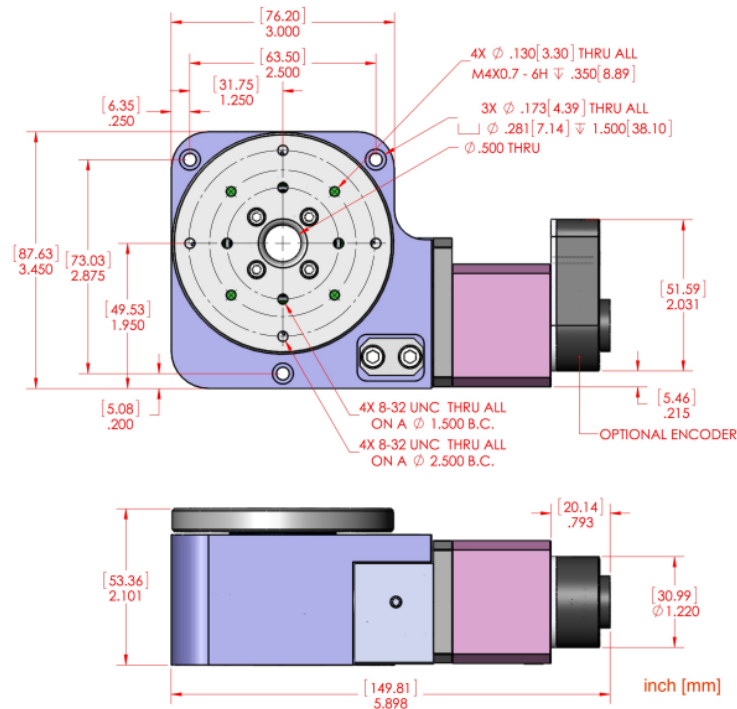
Na obrázku 6.3 jsou vyznačeny síly, jejichž maximální hodnoty jsou následující: maximální vyvinutelný moment  $T_z = 4,5 \text{ Nm}$ , maximální zátěžná síla působící axiálně na rotující disk  $F_z$  nesmí překročit  $200 \text{ N}$ , což odpovídá  $20,4 \text{ kg}$ . Maximální hodnota momentu  $M_a$  je stanovena na  $13,5 \text{ Nm}$ . Právě pro snížení této síly byla na pravou stranu kamerového lože umístěna rotační vazba, snižující klopný moment  $M_a$  téměř na nulu.



$$\begin{aligned}
 M_a &= F_z \cdot l \\
 M_a &= (m \cdot g) \cdot l \\
 M_a &= (5 \cdot 9,81) \cdot 0,065 \\
 M_a &= 3,19 \text{ Nm}
 \end{aligned}
 \tag{6.4}$$

V rovnici 6.4 je výpočet velikosti momentu  $M_a$  v případě, kdy by byla kamera přímo připojena k rotačnímu manipulátoru. Vzdálenost těžiště kamery od plochy rotátoru je rovna  $l$ ,  $m$  je hmotnost kamery a  $g$  je gravitační zrychlení. Z hodnot je patrná potřeba druhého uložení a to i bez zahrnutí hmotnosti kamerového lože.

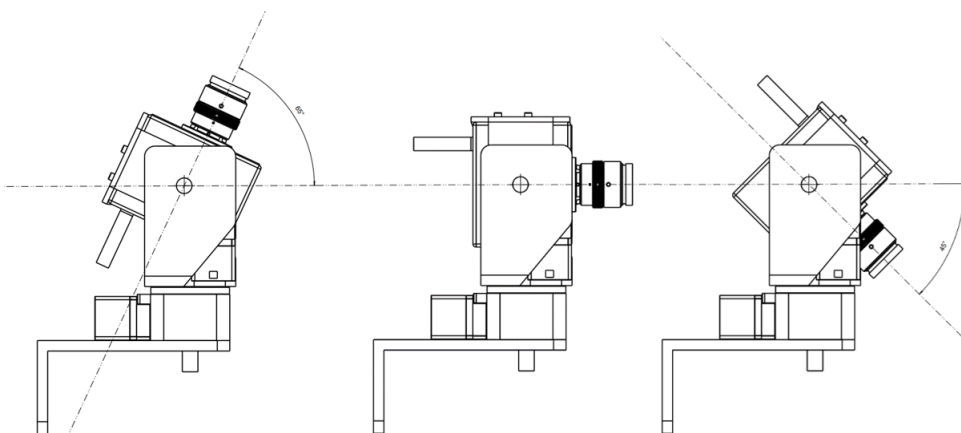
Rozsah pohybu rotační platformy je  $360^\circ$ . Otočný modul *RM-3* využívá šnekový převod s dostupnými převodovými poměry 90:1 a 45:1. Rychlosti rotací jsou pro krokový motor a převodový poměr 90:1  $30^\circ/s$  a pro převodový poměr 45:1  $50^\circ/s$ . Opakovatelná přesnost dosažení polohy je rovna  $0,02^\circ$ . Hmotnost rotační platformy včetně motorizace činí  $1,4 \text{ kg}$ . Řízení je plně elektronické a probíhá pomocí *RS-422*. Nastavování úhlů bude tedy plně automatizované.



**Obrázek 6.4:** Rozměry rotační platformy RM-3 s krokovým motorem [40].

Rozsah rotace kamery v loži je omezen. Omezení plyne z objektivu kamery a elektrickým přípojkám, které nedovolují rotaci o  $360^\circ$ . Maximální úhel

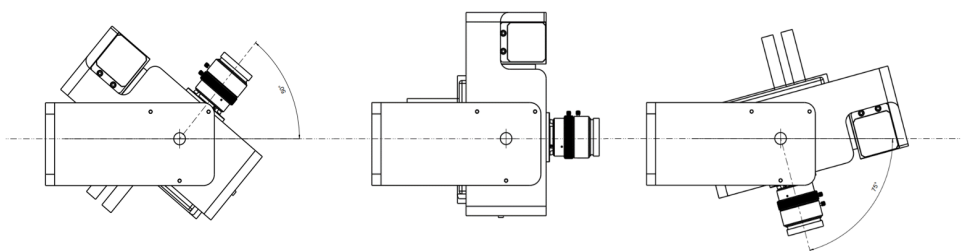
natočení kamery  $\alpha$  je průměrně  $55^\circ$  od nulové horizontální pozice kamery. Omezení pohybu je žádoucí s ohledem na připojenou kamerovou kabeláž.



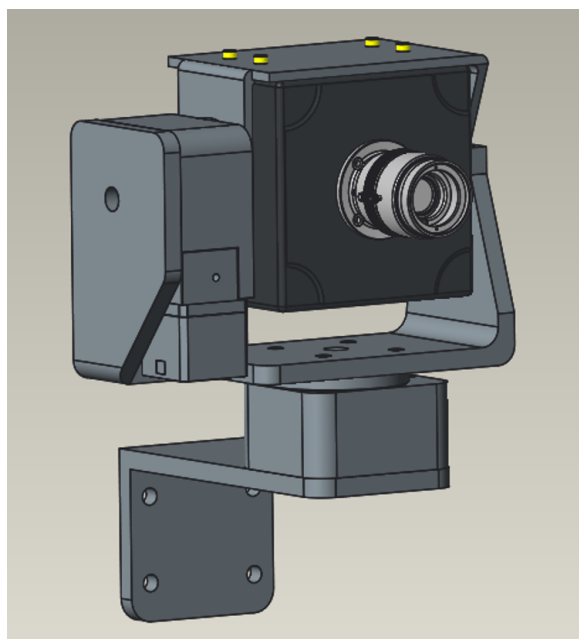
**Obrázek 6.5:** Vysokorychlostní kamera je umístěná v loži s rotačním uložením. Maximální úhly natočení  $\alpha$  jsou vyznačené. Rotační pohyb je omezen kabely motorů, kamery a objektivem.

Rotační jednotka, ke které je připojeno kamerové lože, je spojena šroubovým spojem s nosičem. Na levé straně nosiče je rotační jednotka a na druhé straně prostá rotační vazba čepu v ložisku. Na obrázku 6.5 je vidět návrh uložení kamery pro přesné nastavení úhlu  $\alpha$ . Maximální vychýlení z nulové pozice ve směru vzhůru je  $65^\circ$ , ve směru dolů je rovné  $45^\circ$ . Celkový rozsah je tedy  $110^\circ$ .

Celá tato sestava musí být otočná kolem vertikální osy  $Z$ . Otočná platforma zajišťuje nastavování úhlu  $\beta$  podobně jako v případě úhlu  $\alpha$ . Hmotnost kamery společně s rotačním mechanismem je přibližně  $10\text{ kg}$ . Nosnost  $RM-3$  rotační platformy je cca  $20\text{ kg}$ . Odlehčená konstrukce nosičů kamery tedy umožňuje využití totožné rotační platformy. Využití totožných zařízení zjednodušuje řízení polohovacího kamerového systému a usnadňuje jeho údržbu.



**Obrázek 6.6:** Vysokorychlostní kamera umístěná na rotátoru nastavující úhel  $\beta$ . Omezení rotace je definováno délkou kabelů kamery a motorů na jednu stranu rozsah  $50^\circ$  a na druhou  $75^\circ$ .

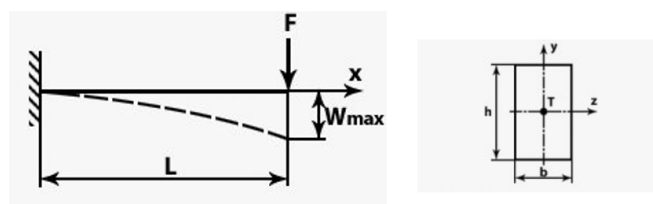


**Obrázek 6.7:** Podoba navrženého efektoru kamery.

Na obrázku 6.7 je vidět celý mechanismus dvouosého rotátoru s vysokorychlostní kamerou. Tento efektor bude umístěn na lineární polohovací moduly.

Cena efektoru se odvíjí hlavně od rotační jednotky *RM-3*. Cena rotační jednotky se pohybuje kolem 35 000 Kč v závislosti na volbě elektromotoru. Ostatní komponenty jako jsou ložiska nebo materiál a jeho opracování představují drobné výdaje v řádech jednotek tisíc Kč. Celková cena efektoru se tedy bude pohybovat do 100 000 Kč.

Propojení efektoru a jezdce lineárního vedení je dosaženo distančním členem. Při konstrukci tohoto členu je nutné zohlednit průhyb nosiče. Průhybem nosiče dojde k vychýlení polohy a úhlu kamery.



**Obrázek 6.8:** Schéma pro výpočet průhybu nosiče efektoru

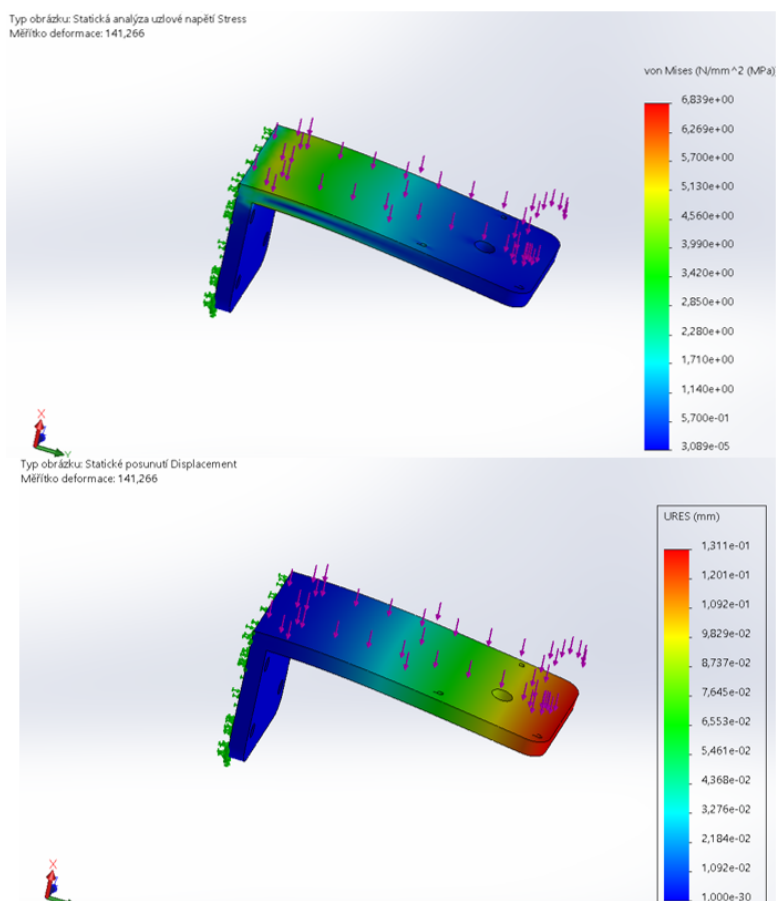
Reálná situace je podobná modelu vetknutému nosníku s působící silou  $F$  ve vzdálenosti  $L$ . Průřez nosiče efektoru je obdélník o rozměrech  $h$  a  $b$ .

Navržená součástka byla analyzována v *SolidWorks*. V simulaci byla modelována situace, kdy je zadní část efektoru připevněna a na horní stranu působí spojité silové pole 110 N, které odpovídá konstantní váze efektoru v provozu.

Konkrétní podoba navrhovaných součástek je závislá na použitých externích součástkách, jakými jsou například rotátory, lineární moduly atd. Například rotátory od různých firem s podobnými parametry mají rozdílné hmotnosti, rozměry, místa připevnění a další. Finální podoba součástky se tedy bude odvíjet i od dostupnosti externích součástí, která ovlivní volbu konkrétního zařízení.

Finální díly projdou před samotnou výrobou softwarovou analýzou, která umožní odhalit slabá místa návrh. Pro představu je provedena analýza na aktuální podobě součásti propojující rotátory a lineární modul osy  $Z$ .

Měřítko deformace je rovné přibližně 141 násobku skutečné deformaci. Navržená součástka se chová podle předpokladů. Nejvíce namáhaným místem je roh uložení, kde uzlové napětí dosahuje  $6,83 \text{ MPa}$ . Největší výchylka je pak tedy na konci součástky a je rovna  $0,13 \text{ mm}$ . Toto posunutí je konstantní díky konstantní působící síle a tudíž lze jeho vliv eliminovat kalibrací.



**Obrázek 6.9:** Analýza součástky spojující efektor s lineárním vedením

## 6.2 Lineární moduly

Pozici kamer v trojrozměrném prostoru zajišťují lineární moduly. Systém lineárních modulů posouvá kameru rovnoběžně s osami  $X$ ,  $Y$ , a  $Z$ . Lineární moduly musejí být dostatečně robustní, aby udržely hmotnost efektoru společně s částmi lineárních modulů a motorizace. Opakovatelnost pohybu lineárních modulů je řádově desetiný milimetru.

Výběr a konstrukci jednotlivých lineárních posuvů rozdělím do tří sekcí podle osy pohybu. Rozdělení do trojice os je výhodné, jelikož na každou osu jsou kladeny rozdílné požadavky na délku vedení, směr a velikost působících sil.

$$J_x = \frac{1}{12} \cdot b^3 \cdot h \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$J_x = \frac{1}{12} \cdot 10^3 \cdot 87,63$$

$$J_x = 7302,5 \text{ mm}^4$$

$$e_x = \frac{b}{2} \text{ [mm]}$$

$$e_x = \frac{10}{2} \tag{6.5}$$

$$e_x = 5 \text{ mm}$$

$$W_x = \frac{J}{e} = \frac{1}{6} \cdot b^2 \cdot h \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$W_x = \frac{1}{6} \cdot 10^2 \cdot 87,63$$

$$W_x = 12798,36 \text{ mm}^3$$

Kvadratický moment obdélníkového průřezu  $J_x$  k ose  $X$  je roven  $7302,5 \text{ mm}^4$ .  $W_x$  je modul průřezu v ohybu k ose  $X$  roven  $12798,36 \text{ mm}^3$ . Nosič je vyroben z duralu, jehož modul pružnosti v tahu  $E$  je roven  $71 \text{ GPa}$ .

$$X_{max} = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot J_x} [mm]$$

$$X_{max} = \frac{100 \cdot 170^3}{3 \cdot 71 \cdot 10^3 \cdot 7302,5}$$

$$X_{max} = 0,31 \text{ mm}$$

(6.6)

$$\alpha_{dis} = \tan \left( \frac{X_{max}}{L} \right)^{-1} [^\circ]$$

$$\alpha_{dis} = \tan \left( \frac{0,31}{170} \right)^{-1}$$

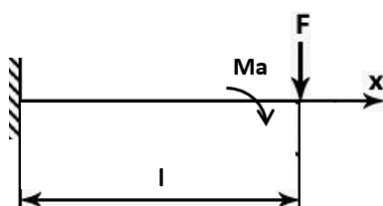
$$\alpha_{dis} = 0,104^\circ$$

Pozice kamery je vlivem ohybu nosiče efektoru vychýlena z definované pozice o  $X_{max} = 0,31 \text{ mm}$ . Posuvem kamery dochází také k naklopení úhlu snímání  $\alpha$  je vychýlen o  $0,1^\circ$  směrem dolů. Rotací efektoru se nepatrně posune poloha těžiště vůči kotvící ploše. Vychýlení a naklopení způsobené rotací  $\beta$  je zanedbatelné.

K eliminaci této nepřesnosti je možné zvolit výhodnější průřez nosiče efektoru nebo použít přidavných podpěr. Další možností je využití stabilního vychýlení efektoru. Stabilní vychýlení lze zachovat a následně provést korekci pomocí řízení, upravením počátečních souřadnic.

### ■ 6.2.1 Lineární modul osy Z

Efektor zajišťující uložení a naklápění kamery je připevněn k vertikálně orientovanému lineárnímu modulu. Aby byl zajištěn větší rozsah natočeného úhlu  $\beta$ , je efektor předsunutý vzhledem k tělu lineárního modulu. Za tímto účelem je zkonstruována distanční destička z duralu propojující efektor s jezdcem modulu osy Z. Požadavky na nosnost jsou přizpůsobeny umístěním a hmotností efektoru. Těžiště efektoru je umístěno od jezdce lineárního modulu ve vzdálenosti  $170 \text{ mm}$ . Díky této vzdálenosti je na lineární modul vyvíjen klopný moment kolem osy rovnoběžné s osou pohybu Y. Rychlost nastavování pozic kamer bude omezena na  $0,1 \text{ m/s}$ . Poloha efektoru na ose Z bude nastavována jako poslední souřadnice.



**Obrázek 6.10:** Schéma vzniku momentového zatížení  $M_a$  vzniklého hmotností efektoru.

$$F = m \cdot g$$

$$F = 10 \cdot 9,81$$

$$F = 98,1 \text{ N}$$

(6.7)

$$M_a = F \cdot l$$

$$M_a = 98,1 \cdot 0,17$$

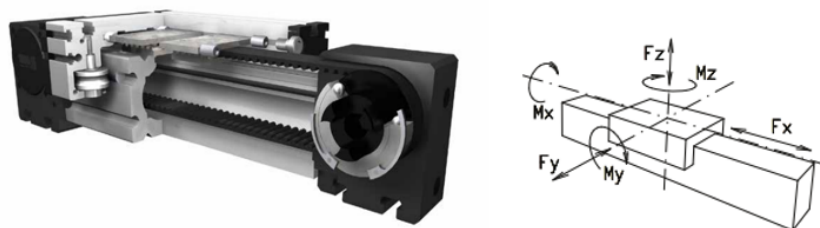
$$M_a = 16,68 \text{ Nm}$$

Klopný moment působící na jezdec lineárního vedení  $Z$  je rovný  $16,68 \text{ Nm}$ . V návrhu dále je uvažována hmotnost efektoru  $15 \text{ kg}$ . Zvýšení uvažovaného zatížení je nutné kvůli bezpečnosti systému. Rychlost pohybu jezdce je také omezena vlivem kinetického momentu. Moment hybnosti způsobuje navýšení působícího klopného momentu při pohybu vzhůru. Lineární vedení musí být dostatečně robustní, aby odolalo působení klopných momentů kolem  $20 \text{ Nm}$ .

Výhody robustního vedení jsou doprovázeny vysokou hmotností. Robustnější vedení je těžší a tím způsobuje větší silové namáhání navazujících lineárních vedení. Z tohoto důvodu je nutné optimalizovat nosnost lineárního vedení a maximální pracovní rychlost.

Požadavek na délku vedení je dán limitními polohami kamerových pozic. Nejnižší poloha kamer, která se využívá při aktivačních zkouškách kolenních airbagů je  $400 \text{ mm}$  nad úroveň podlahy. Nejvyšší pozice kamery je stanovena na  $2100 \text{ mm}$  nad úroveň podlahy. Teoreticky potřebná délka vedení je tedy  $1700 \text{ mm}$ . K této délce je však nutné připočítat manipulační prostor  $100 \text{ mm}$ , aby limitní polohy kamery nebyly v úvratích. Celková délka lineárního vedení osy  $Z$  je tedy  $1800 \text{ mm}$ .

Vhodným vedením je lineární modul  $ELZ 40$ . Žádaná délka vedení splňuje maximální přípustnou délku vedení, která je  $6000 \text{ mm}$ . Pohyb jezdce je zajištěn motorem, který je spojen ozubeným řemenem. Obousměrná opakovatelnost dosažení polohy je rovna  $\pm 0,1 \text{ mm}$ . Z tabulky 6.1 jsou patrná maximální silová zatížení. Hlavním sledovaným zatížením je hodnota klopného momentu



**Obrázek 6.11:** Lineární modul osy  $Z$  se znázorněným silovým namáháním [42].

Velikost	ELZ 40	
	Statická	Dynamická
$F_x$ [N]	390	350
$F_y$ [N]	1200	700
$F_z$ [N]	900	650
$M_x$ [Nm]	25	20
$M_y$ [Nm]	32	18
$M_z$ [Nm]	35	25

**Tabulka 6.1:** Maximální přípustné silové namáhání lineárního modulu osy v horizontální poloze [42]  $Z$

$M_y$ , tento klopný moment vzniká polohou efektoru a je roven hodnotě 16,68 Nm. Lineární vedení splňuje všechny zadané silové požadavky. Maximální rychlost vedení je rovna 4 m/s a hmotnost lineárního vedení včetně spojky a elektromotoru je rovna 8,9 kg.

Pohon osy  $Z$  spolehlivě zajistí dvoufázový bipolární krokový motor *Ezi-SERVO-ST-86M*. Krokový motor je vybaven enkodérem inkrementálního optického snímače a driverem. Enkodér je schopný zaznamenat 10 000 pulzů na jednu otáčku, což umožňuje přesné polohování. Přídržný moment hřídele je roven 4,5 Nm.

Ezi-servo je systém založený na spojení optického enkodéru s krokovým motorem a inteligentním řízením. Toto spojení tvoří uzavřený regulační obvod a zaručuje přesné polohování s rychlostí zpětné vazby 25  $\mu s$ . Motor je propojen s řemenicí lineárního vedení skrz planetovou převodovku *PEII070-003* s převodovým poměrem 3:1 a spojku. Hmotnost propojovacích elementů je 1,2 kg.

Kabely rotátorů, kamery a motoru osy  $Z$  budou uloženy v energořetězu.

### ■ 6.2.2 Lineární modul osy $Y$

Následující navrhovanou součástí je nosný prvek zajišťující pohyb v ose  $Y$ . Tento modul pohybuje s vysokorychlostní kamerou rovnoběžně s kolejí, která dopravuje zkoušenou sestavu dovnitř a ven z klimatické komory. Lineární modul je namáhán na krut a průhyb. Jako nejvíce namáhaný prvek je to



zároveň kritický navrhovaný člen systému a je nutné, aby spolehlivě vykonával předepsanou činnost.

Složení rozsahů pohybu v ose  $Y$  s rozsahem pohybu lineárního modulu osy  $Z$  dostaneme rovinu vertikální, do které lze nastavovat polohu kamery.

Rozsah pohybu lze libovolně přizpůsobit, délky profilů jsou dostupné v normalizovaných délkách nebo je lze upravit do požadované délky. Ideální délka vedení pro prostory zkušebny je  $1200\text{ mm}$ . Tato délka umožňuje dostatečné pokrytí požadovaných poloh vysokorychlostních kamer.

Nosnost vedení se odvíjí od hmotnosti lineárního pohonu osy  $Z$  a hmotnosti efektoru. Je nutné zajistit pevné propojení jezdců modulu s tělem lineárního pohonu osy  $Z$ . Spojení je uskutečněno šroubovým spojením. Hmotnost, se kterou modul  $Y$  osy musí kooperovat je rovna  $35\text{ kg}$ . V hmotnosti je započítána hmotnost efektoru a  $Z$  lineárního modulu včetně pohonů a kabeláže.

$$\begin{aligned} F &= m \cdot g \\ F &= 35 \cdot 9,81 \\ F &= 343,35\text{ N} \end{aligned} \tag{6.8}$$

$$\begin{aligned} M_a &= F \cdot l \\ M_a &= 343,35 \cdot 0,11 \\ M_a &= 37,77\text{ Nm} \end{aligned}$$

Obdobně jako u lineárního modulu osy  $Z$  je vedení namáháno klopným momentem, který vzniká působením gravitační síly. Směr působení momentu odpovídá momentu  $M_x$  z obrázku 6.11. Místo působení je síly  $F = 343\text{ N}$  je vzdáleno  $110\text{ mm}$  od hrany lineárního vedení. Vzniklý klopný moment je roven  $38\text{ Nm}$  a způsobuje značné torzní namáhání lineárního vedení.

Pro lineární vedení  $Y$  osy je hlavní schopnost odolávat torznímu zatížení, z toho důvodu je zvoleno vedení složené ze dvou vodících profilů. Dvojice profilů umožňuje efektivněji rozložit silové působení. Jeden profil  $ELZ\ 60$  je osazen krokovým motorem a druhý slouží jako podpěrný. Lepší rozložení sil zajišťují podpěry.

$$\begin{aligned} w &= \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I \cdot 192} \\ w &= \frac{343,35 \cdot 1200^3}{70 \cdot 10^3 \cdot 6,79 \cdot 10^5 \cdot 192} \\ w &= 0,065\text{ mm} \end{aligned} \tag{6.9}$$

Velikost	ELZ 60	
	Statické	Dynamická
Síla/Moment		
$F_x$ [N]	894	800
$F_y$ [N]	3000	2000
$F_z$ [N]	1700	1100
$M_x$ [Nm]	67	43
$M_y$ [Nm]	90	70
$M_z$ [Nm]	12	100

**Tabulka 6.2:** Maximální přípustné silové namáhání lineárního modulu osy  $Y$

Průhyb lineárního modulu  $w$  je vypočítán následujícím vztahem 6.9 výpočetní vztahy jsou získány z katalogu výrobku.[42]. Kde  $E$  [ $N/mm^2$ ] je modul pružnosti v tahu,  $I$  [ $mm^4$ ] je kvadratický modul průřezu v ohybu a  $L$  je délka vedení v milimetrech. Průhyb je počítán pro nejhorší situaci, tedy sílu působící ve středu lineárního vedení. Celkový průhyb vzniklý statickým zatížením je roven 0,064 mm.

Pohon osy  $y$  zajišťuje dvoufázový bipolární krokový motor *Ezi-SERVO-ST-86L*. Krokový motor je vybaven enkodérem v podobě inkrementálního optického snímače a driverem. Enkodér je schopný zaznamenat 10 000 pulzů na jednu otáčku, což umožňuje přesné polohování.

Motor je obdobně propojen s řemenicí lineárního vedení skrze planetovou převodovku *PEII070-003* a torzně pružnou spojku. Převodovka je vybavena samosvornou brzdou, která v případě výpadku napájení zabrání pohybu efektoru.

Hmotnost soustavy se navyšuje o hmotnost motoru, spojky, a lineárních vedení tedy o cca 18 kg včetně přídatku na energořetězy a jejich kabeláž.

### 6.2.3 Lineární modul osy $X$

Rozsah pohybu lineárního modulu osy  $X$  udává nejbližší a nejzazší možnou pozici kamery. Nastavitelnou vzdáleností mezi kamerou a zkoušeným airbagem lze upravovat zorné pole vysokorychlostní kamery. Zorné pole kamery lze podobně ovlivnit i vyměnitelným objektivem. Tento způsob bude také využíván.

Délka vedení umožňující pohyb kamery v požadovaném rozsahu je 700 mm.

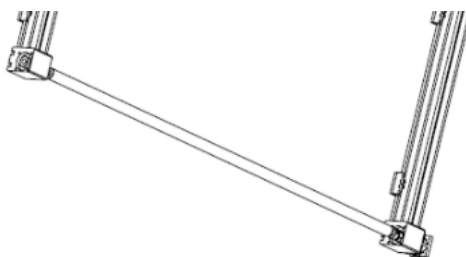
Pro pohyb v ose  $X$  je nutné použít dvojici lineárních modulů, která tvoří koleje pro  $Y$  pojezd a jeho nastavby. Dvojice  $X$  lineárních modulů je propojena spojovací hřídelí motoru a jezdce modulů se pohybují synchronizovaně pomocí jedné motorové jednotky. Výhodou tohoto zapojení je řízení pouze jediného motoru a nehrozí křížení mechanismu, které by mohlo vzniknout pokud by měl každý modul svůj vlastní. Další výhodou jsou nižší pořizovací náklady na hardware.

Silové zatížení modulů je dáno hmotností lineárních modulů os  $Y$ ,  $Z$  a efektoru. Celková hmotnost, se kterou budou  $X$  moduly pohybovat, je přibližně  $55 \text{ kg}$ . Silové působení  $F_z$  ze schématu na obrázku 6.11 je rovné  $540 \text{ N}$ .

Jako vhodné lineární vedení splňující všechny požadavky se ukázalo vedení *ELZ60*. Toto vedení má dostatečnou statickou i dynamickou nosnost a je stejné jako pro  $Y$  osu. Jezdec  $X$  osy je volen odlišně, jelikož zde nepůsobí vysoké klopné momenty jako v předchozím případě a zároveň je potřeba rozdílné uchycení  $Y$  lineárních modulů.

Pohon v ose  $X$  zajišťuje dvoufázový bipolární krokový motor *Ezi-SERVO-ST-86L*. Motorová spojka i planetová převodovka je stejná jako pro osu  $Y$ . Rozdílem je následné propojení os obou lineárních modulů spojovací hřídelí, která přenáší kroutící moment i do druhého vedení.

Hmotnost soustavy se navýší o dalších  $17 \text{ kg}$ . Lineární vedení osy  $X$  je připojeno k statické platformě pomocí šroubů, čímž ukotvuje systém lineárních modulů k pevné kostře.



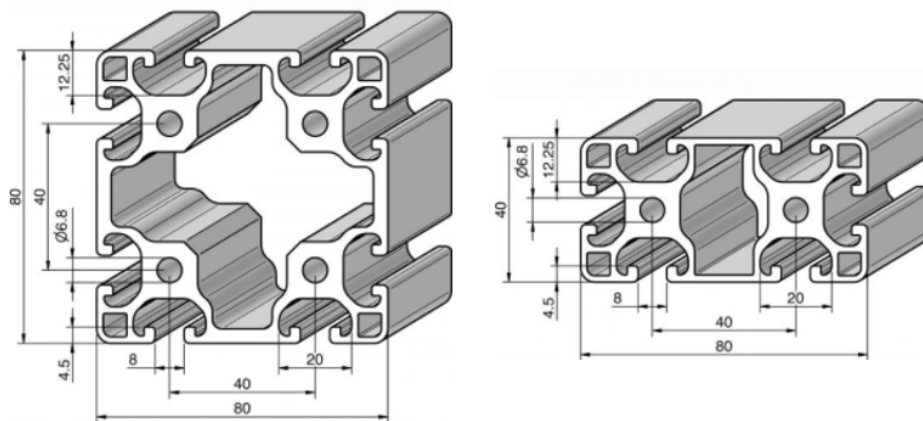
**Obrázek 6.12:** Schéma spojení lineárních modulů pomocí spojovací hřídele.

### 6.3 Statická platforma

Statická platforma slouží jako podstavec pro systém lineárních modulů. Zvyšuje úroveň uložení lineárních modulů a tím rozšiřuje rozsah pohybu  $Z$  osy. Do spodní části lze umístit motorické jednotky, které budou snižovat těžiště modulu. Platforma zároveň tvoří ochrannou bariéru po obvodu lineárních modulů. Tato mechanická bariéra brání nejen průniku cizích předmětů do prostoru, ve kterém se pohybují kamery, ale i opticky odděluje dostupný akční dosah pohybu od okolního prostoru zkušebny.

Rám statické platformy s vysokou tuhostí tvoří kostru polohovací jednotky. Platforma je pevně spojena šroubovým spojením s lineárními moduly osy  $X$ . Zvýšenou tuhost zajišťují ocelové pláty ve tvaru  $L$ , které se umístí do spojů profilů Kostra zajišťuje pevnou základnu, se kterou lze v případě potřeby pohybovat. Cílem pevné základny je udržet pevný tvar. Pevný tvar kostry brání vzniku deformací během pohybu, které by vedly k nepřesnostem.

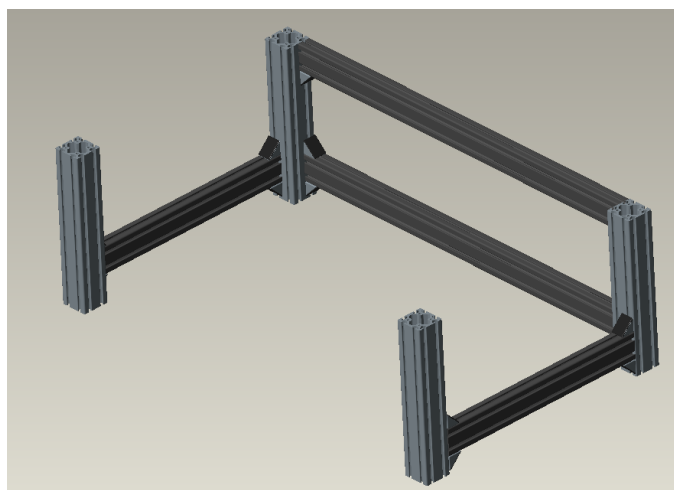
Ideálním materiálem pro výrobu platformy jsou přesné hliníkové profily. Jsou lehké, přesné a dostupné v různých velikostech a provedeních. K profilům je k dispozici i velké množství příslušenství, které například umožní vedení kabelů.



**Obrázek 6.13:** Hliníkové profily statické platformy [43].

Rohové stojny platformy lze vyrobit z hliníkových profilů s označením  $80x80L$ . Rozměry profilu jsou vidět na levé straně obrázku 6.13. Hmotnost profilu je  $5,19 \text{ kg}$  na jeden metr délky. Nízká hmotnost duralového profilu zajišťuje robustní a zároveň lehkou konstrukci. Ve vnitřní dutině profilu lze vést část kabelových rozvodů, a tím zajistit kompaktnější pohyb polohovací jednotky. Spodní část profilu umožňuje vytvoření lože pro zajištění mechanismu kolo, který bude zajišťovat pohyblivost.

Podélné profily platformy je možné vidět na pravé straně obrázku 6.13. Tento profil je značen jako  $80x40L$ . Hmotnost jednoho metru profilu je  $3,07 \text{ kg}$ . Podélné profily jsou postavené na výšku a jsou s rohovými spojené ve vnější drážce rohových profilů, aby maximalizovaly vnitřní prostor.



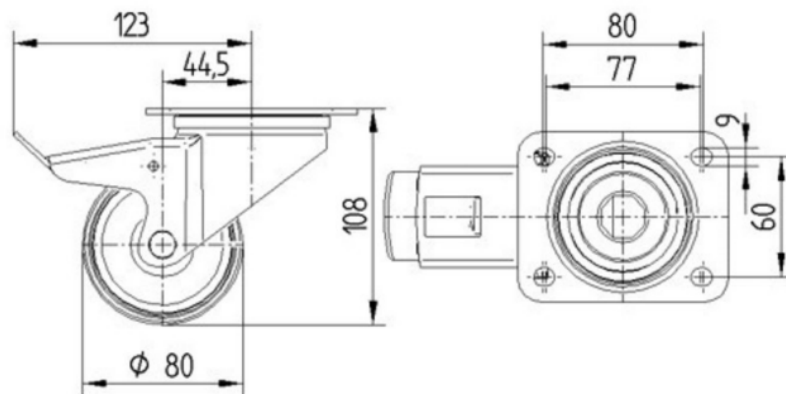
**Obrázek 6.14:** Model platformy, na kterou bude uložen systém lineárních modulů

Spojení profilů je uskutečněno rohovými spojkami, které jsou dostupné jako příslušenství. Aby byla zajištěna ještě větší tuhost rámu jsou do kruhových otvorů v čelech *80x40L* profilů říznuty závity. V daných výškách profilů *80x80L* jsou vyvrtány otvory, skrze které jsou protaženy šrouby, které jsou zatočeny do připravených závitů. Sešroubovaný rám není absolutně tuhý. Nižší tuhost šroubových spojů umožňuje deformaci rámu, které je využito pro čtyřbodové uložení konstrukce na podlahu.

### ■ 6.3.1 Pohyb jednotky

Pohyb je zajištěn manuálně. Obsluha ručně dotlačí polohovací jednotku na definované místo. Kola na spodní straně platformy umožňují hladký přesun kamerové polohovací jednotky po hladkém povrchu litého betonu s nátěrem. Jako kola lze využít například přístrojová antistatické otočné kolo s totální brzdou, která bude sloužit jako aretace.

Kolo je vyrobeno z ocelového pozinkovaného výlisku a je vybaveno ochranou proti namotávání vláken. Kolo je schopné provozu v teplotách od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  dé  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jako běhoun je použita polyamid. Drobnou deformací a zatížením kol je zajištěno dosednutí všech čtyř kol na podlahu.

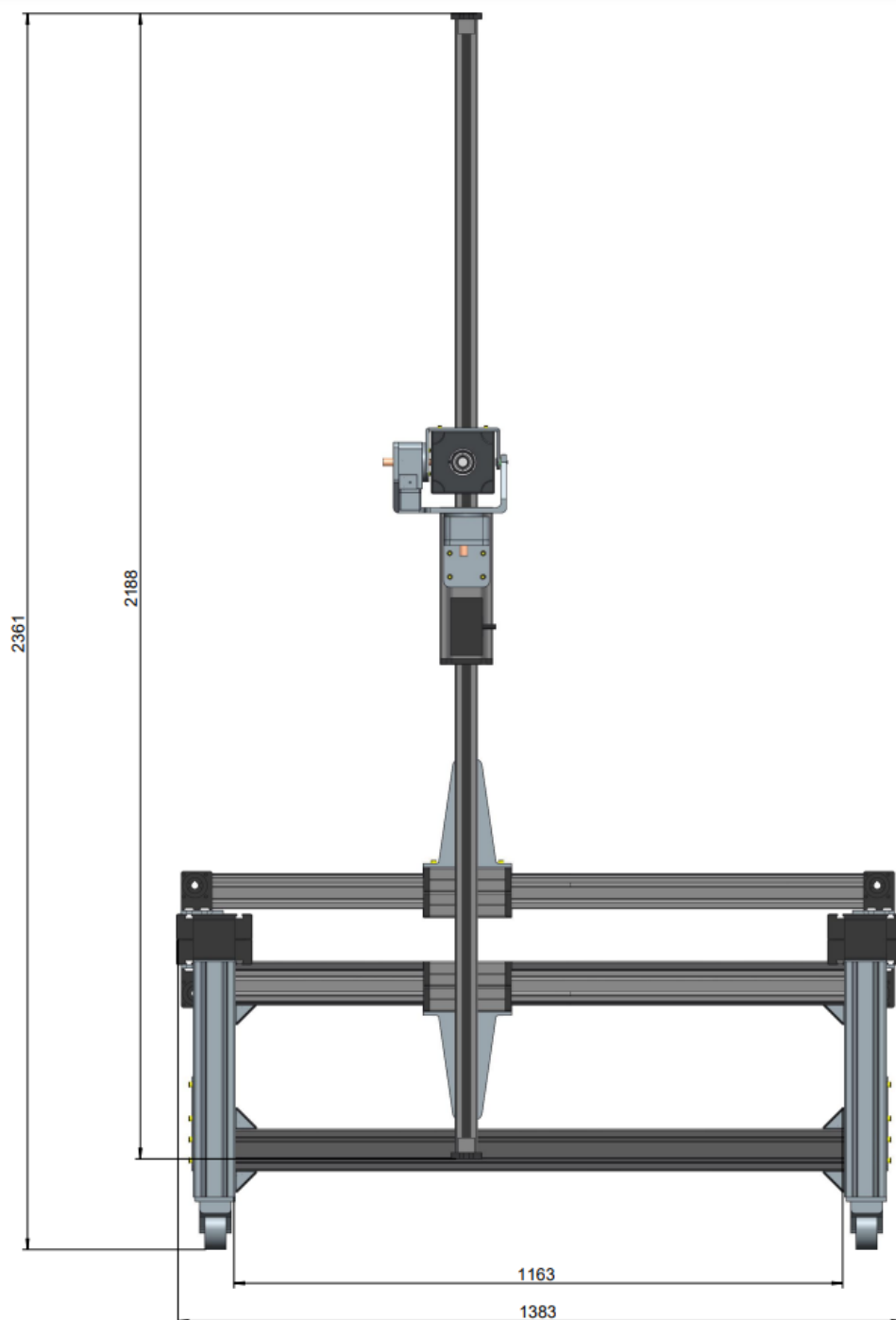


**Obrázek 6.15:** Kolo zajišťující hladký posuv polohovací jednotky[44].

Kola jsou umístěna v rozích platformy. Maximální dynamická nosnost jednoho kola je 200 kg. Maximální statické zatížení na jedno kolo je rovné 400 kg. Celková hmotnost navržené soustavy nepřesahuje 130 kg. Pro zvýšení stability jsou kola umístěna ve vnějších rozích platformy. Kola jsou v souladu s normou *EN 12532*. Maximální rychlost pohybu je limitována na 1,1 m/s.

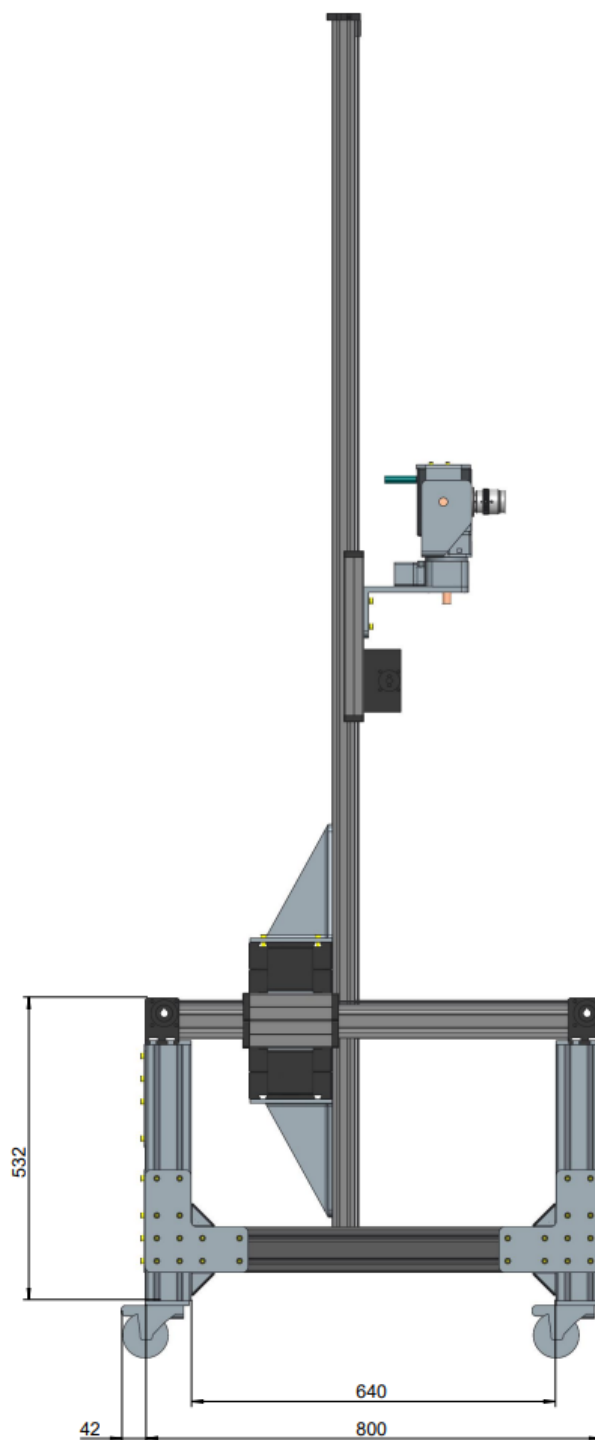


**Obrázek 6.16:** Podoba konstrukčního návrhu polohovací jednotky pro vysokorychlostní kamery.

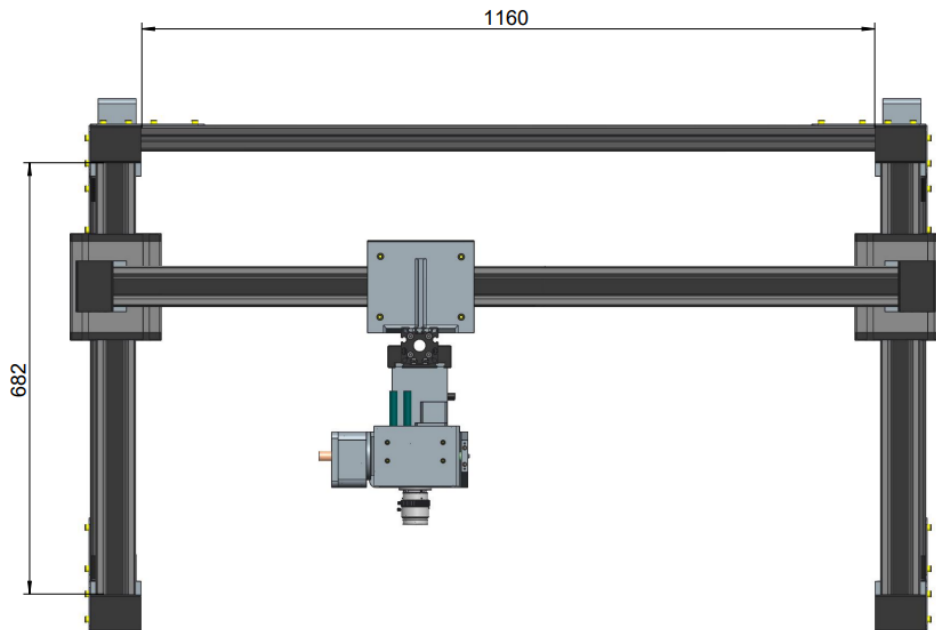


**Obrázek 6.17:** Podoba konstrukčního návrhu polohovací jednotky pro vysokorychlostní kamery, čelní pohled.





**Obrázek 6.18:** Podoba konstrukčního návrhu polohovací jednotky pro vysokorychlostní kamery, boční pohled.



**Obrázek 6.19:** Podoba konstrukčního návrhu polohovací jednotky pro vysokorychlostní kamery, horní pohled.

### 6.3.2 Pozicování platformem ve zkušebně

Umístění polohovacích kamerových jednotek uvnitř zkušebny je posledním krokem návrhu. S přesnými polohovacími mechanismy je možné zaručit vysokou opakovatelnost dosažení definovaných pozic, která je pro lineární pozice v řádech desetin milimetrů a v úhlech pod  $1^\circ$ . Tato opakovatelnost však platí pouze pokud by byla jednotka pevně připojena. V případě pohyblivých jednotek je ještě nutné zajistit, aby poloha polohovací jednotky byla vždy na stejné pozici.

Pozice kamer jsou stanoveny příslušnými normami a požadavky zákazníků. Z těchto požadavků plynou i přibližné pozice platform. Do těchto pozic musejí být platformy umístěny. Přesnost umístění ovlivňuje výsledné zorné pole vysokorychlostních kamer. K zajištění přesné pozice kamer lze přistupovat z více směrů.

Prvním přístupem je nalezení optimálních pevných pozic pro platformy. Nalezením optimálních pozic samo o sobě ještě nezaručuje shodnost umístění kamer, ale pouze maximalizuje pokrytí. Shodnost umístění je dosažena až přesným nastavením pozic platform. Pro přesné nastavení je třeba vyvinout naváděcí prvky, pomocí kterých bude možné umístit platformu do zkušebny na milimetr přesně. Optimalizace pozic je však limitována na dosavadní potřeby. Přidáváním nových modulů na testování spolu s novými požadavky zákazníků se potřeby změní. Nelze tedy stanovit univerzální "optimální" polohu, která

vyhovuje všem zkušebními potřebám.

Lokalizační prvky mohou mít například podobu mechanických zarážek, ke kterým je platforma přitlačena a v definované poloze aretována. Další možnost může vypadat jako souřadnicová síť na podlaze zkušebny. Klíčem ke správné funkci systému je tedy prvotní přesné nastavení předepsaných pozic platformem. Všechny nepřesnosti v pozici platformy se projeví na výsledný obraz.

Nastavování pozic platformem do definovaných pozic s milimetrovou tolerancí by bylo pro obsluhu náročné a mohlo by snadno vést k nepřesnostem. Zjednodušení a hlavně zpřesnění je zprostředkováno druhým přístupem pozicování platformem.

Druhý přístup pozicování platformem a potažmo i kamer je založen na korelaci obrazu kamery. Nástrojem přesného pozicování se tedy stane již přítomná vysokorychlostní kamera. V tomto případě není nutné zcela přesné dosažení definovaných pozic platformy jako tomu bylo v předchozím případě. Přibližná poloha platformy stačí k tomu, aby řídicí algoritmus dohledal z aktuální pozice žádanou pozici kamery.

Algoritmus využívá předem známého výsledku. Jako žádaný výsledek je volen referenční snímek, který je získán z prvního zkušební kusu daného typu airbagového modulu. Tato obrazová předloha je porovnávána s aktuálním obrazem kamery. Algoritmus stanovuje polohy maxima statistické funkce korelace aktuálního a referenčního obrazu. Řídicí algoritmus pak vyhodnotí svou pozici a upraví souřadnice lineárních modulů. Kontrola pozic by mohla postupně nastavovat polohy os dokud by nebyla nalezená dostatečná shoda.

V případě, kdy algoritmus nedokáže zajistit dostatečnou shodu obrazu, z důvodu omezeného dosahu lineárního pojezdu. Tedy v situaci, kdy algoritmus požaduje pohyb ve směru, který již hardware neumožňuje. Sdělí tuto skutečnost operátoru včetně informace o požadovaném směru posunu polohovací jednotky.

Pokud je systém mechanicky nastavený zcela mimo plánované zorné pole. Tedy aktuální zorné pole nekoreluje s referenčním. Měl by algoritmus obsahovat i mód hledání. Mód hledání by vyzkoušel pohyb v části pohybového rozsahu, jestli nebude schopen najít shodu. Pokud nenajde, dojde k vyzvání operátora systému ke kontrole pozice jednotky. Obdobné navádějící algoritmy je možné také vidět například v některých kvadroptérech či jiných pohyblivých strojích s kamerami. Tyto stroje jsou díky tomu schopné autonomně sledovat zadaný objekt, či drobně upravovat svou pozici.

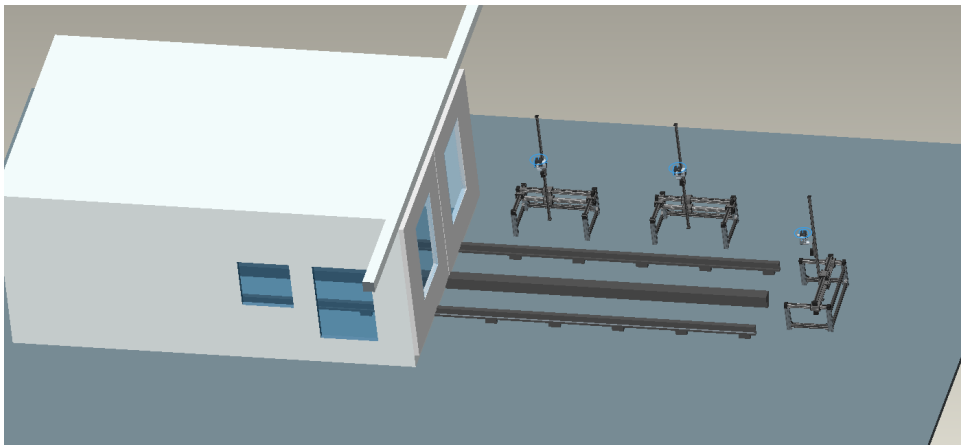
V praxi to tedy umožňuje efektivně řešit následující situaci. Platforma je umístěna mimo přesnou pozici i o desítky milimetrů, proběhne nastavení kamery do předepsaných souřadnic v rámci lineárních a úhlových manipulátorů.

V této teoreticky přesné poloze proběhne kontrola aktuálního snímku kamery s referenčním snímkem. Pokud jsou snímky vyhodnoceny korelačním řídicím algoritmem jako rozdílné tedy mimo toleranční pole, následuje hledání přesnější pozice. Pozice je hledána pohybem lineárních modulů, během kterých je sledován vývoj korelační funkce. Řídicí algoritmus má omezení, kterým je minimální překryv aktuálního snímku a snímku referenčního.

Příkladem provozu může být situace, kdy hodnota korelační funkce roste s rostoucí souřadnicí osy  $Y$ . Algoritmus tedy postupně zvyšuje souřadnici osy  $Y$ , ta se zvyšuje dokud hodnota funkce korelace nezačne klesat. Tím je nalezena správná pozice osy  $Y$ . Analogicky dochází k nastavení i dalších souřadnic.

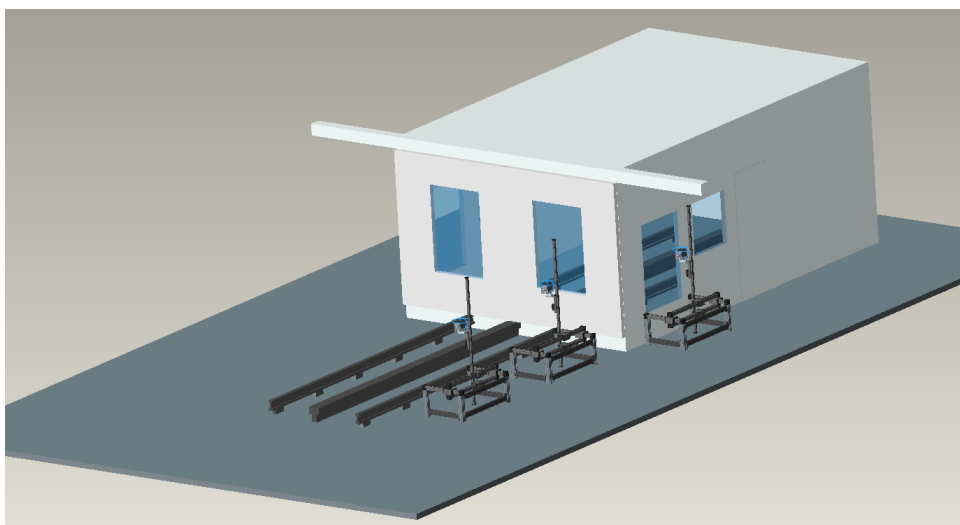
Toto dodatečné ověřování a doladování pozic vysokorychlostních kamer eliminuje i případné odchylky lineárních modulů a další nepřesnosti plynoucí z okolních podmínek.

Jako referenční snímek může být použita konkrétní zkušební sestava. Pokud by však v průběhu zejména sériových zkoušek docházelo k vizuálním změnám zkušební sestavy, bylo by výhodnější vybavit prostor zkušebny orientačními značkami. Orientační značky by umožnili nalezení správné pozice i pro rozdílné podoby zkoušených modulů.



**Obrázek 6.20:** Příklad uložení polohovacích jednotek v prostoru před klimatickou komorou.

Optimalizace pozic jednotek v tomto případě vychází z praxe a je majoritně dána typem airbagu. Díky volnému uspořádání je možné v případě potřeby posunout pozici rámu bez závažného dopadu na nastavování kamer.



**Obrázek 6.21:** Příklad uložení polohovacích jednotek v prostoru vedle klimatizované komory a v prostoru před. Ukazující snadnou změnu polohy polohovacích jednotek.

## 6.4 Výsledný systém

Výsledný systém je dán složením jednotlivých částí. Postup montáže je následující. Prvním krokem je sešroubování hliníkových profilů nosné platformy. Do rohových profilů se následně zalisují pouzdra pro kola do předem vyfrézovaných prostor. Pouzdra se osadí kolečky a platforma je dokončena.

Následujícím krokem je instalace lineárních modulů. Nejprve je umístěna dvojice lineárních modulů osy  $X$ , která je připojena k platformě. Mezi jezdcy je připevněn lineární modul osy  $Y$ . Poslední  $Z$  lineární modul je zadní stranou připevněn k jezdcí  $X$  pojezdu. Na přední straně  $Z$  modulu je jezdec, na který se připevní nosič s efektořem.

Cena navrhovaných součástí a komponent, tedy lineárních a rotačních aktuátorů, hliníkových profilů, součástí statické platformy, kabeláže k motorům a kamerových supportů se vejde do 400 tisíc Kč. Přesná cena je závislá na aktuální dostupnosti surovin a součástí. K ceně systému bude nutné připočítat i položku řídicího systému. Odhadovaná cena řídicího systému je přibližně 250 tisíc korun.

Každá polohovací jednotka může mít vlastní řídicí systém, který zaručí úplnou nezávislost jednotek. Nevýhodou modulárního řízení je nutnost použití většího množství separátních řídicích systémů, které se ovládaní odděleně. Další možností je zvolit centralizované řízení, které bude z jednoho stanoviště řídit více polohovacích jednotek. S ohledem na finanční stránku a pohodlnost ovládaní je vhodnější centralizované řízení.

## Kapitola 7

### Závěr

V diplomové práci byly představeny a popsány různé typy airbagových zádržných systémů, včetně jejich součástí. Dále byl popsán pozitivní vliv airbagových modulů na bezpečnost v silničních vozidlech s ohledem na biomechanická kritéria.

Legislativa zabývající se airbagy a jejich testování je zmíněna v druhé polovině teoretické části práce. Je zde popsán i průběh enviromentálních a aktivačních zkoušek.

Praktická část práce je zaměřena na návrh polohovacího kamerového systému pro aktivační zkoušky airbagových modulů.

Před samotným návrhem systému bylo nejprve nutné stanovit samotné zadání, co má systém vykonávat a jak. Online komunikací se zaměstnanci i osobními analýzami prostorů zkušebny a procesů zkoušek jsem postupně nalezl zadání, včetně technických požadavků na polohovací kamerový systém.

Iterační proces tvorby zadání, jak by měl systém vypadat bylo velmi komplikované a zdouhavé. Po finálním ověření shodnosti technických požadavků zadání bylo vytvořeno několik návrhů možné podoby kamerového systému. Jednotlivé návrhy byly založené na rozdílných mechanismech a sloužily jako demonstrativní příklady.

Návrhy systému byly představeny zaměstnancům a vedení zkušebny, kteří vybrali návrh pro detailnější zpracování. Dle kritérií plynoucích z požadavků jsem nezávisle posoudil vhodnosti jednotlivých návrhů. Jako nejvhodnější návrh se v obou případech ukázal návrh číslo 7, který je složen ze statické platformy, na které jsou umístěny lineární a rotační moduly sloužící k přesnému nastavování polohy vysokorychlostní kamery.

Konstrukcí systému byla navržena podoba kamerového supportu, která zajišťuje bezpečné uložení vysokorychlostní kamery a její rotaci ve dvou osách v souladu se zadanými parametry. Následně byly stanoveny délky a typy lineárních modulů, které zajistí přesné pozicování kamer v osách  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Posledním předmětem konstrukce bylo navržení statické platformy, na kterou jsou připevněny pohybové moduly. Součástí konstrukce platformy byl i návrh způsobu polohování jednotky v prostoru zkušebny. Pohyb je zajištěn kuličkovými koly, které umožňují hladký pohyb po podlaze zkušebny.

Součástí návrhu bylo i stanovení ceny polohovacího systému. Cena všech mechanických komponent a motorů jedné polohovací jednotky se pohybuje do 400 tisíc korun. Řídící systém pro všechny jednotky bude stát odhadem 250 tisíc korun. Celková cena systému je tedy úměrná množství polohovacích jednotek.

Výhodou systému je jeho modularita, která umožňuje v případě potřeby přidat další polohovací jednotku a tím i další vysokorychlostní kameru bez omezení funkčnosti zbytku systému. Systém byl navržen tak, aby mohl být provozován ve stávající podobě zkušebny bez nutnosti její přestavby. Navržený systém lze podle specifikací postavit, vybavit řízením a provozovat při aktivačních zkouškách

## Odkazy

- [1](20. břez. 2020). Nehody v dopravě - časové řady, Nehody v dopravě - časové řady, WWW: [https://www.czso.cz/csu/czso/nehody\\_v\\_doprave\\_casove\\_rady](https://www.czso.cz/csu/czso/nehody_v_doprave_casove_rady) (cit. 20.03.2021).
- [2]K.-U. Schmitt, ed., *Trauma biomechanics: accidental injury in traffic and sports*, 2nd ed, Berlin ; New York: Springer, 2007, 210 **pagetotals**, ISBN: 978-3-540-73872-5.
- [3]J. Kovanda, České vysoké učení technické v Praze a Ústav bezpečnostních technologií a inženýrství, *Bezpečnostní aspekty návrhu dopravních prostředků*. 2016, OCLC: 949215546, ISBN: 978-80-01-05893-0.
- [4]“Crash analysis criteria description”, s. 142,
- [5](4. červ. 2020). How long does neck pain last after a car accident?, Metro Health NYC, WWW: <https://www.metrohealthnyc.com/neck-pain-after-a-car-accident/> (cit. 02.08.2021).
- [6]G. Mastinu a M. Plöchl, ed., *Road and off-road vehicle system dynamics handbook*, Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014, 1694 **pagetotals**, ISBN: 978-0-8493-3322-4.
- [7]A. Hutchinson, *Popular mechanics: big ideas: 100 modern inventions that have changed our lives*. New York: Hearst Books, 2009, 256 **pagetotals**, ISBN: 978-1-58816-722-4.
- [8]M.-B. i. t. f. a. y. a. T. s. o. t. s. t. s. l.-C. o. says. (3. pros. 2020). Mercedes-Benz installed the first airbag 40 years ago. The story of the system that saves lives, MercedesBlog, WWW: <https://mercedesblog.com/mercedes-benz-installed-the-first-airbag-40-years-ago-the-story-of-the-system-that-saves-lives/> (cit. 02.01.2021).
- [9](2007). Toyota to Make Side Airbags and Curtain Shield Airbags Standard on All New Passenger Vehicle Models in Japan, WWW: <https://www.theautochannel.com/news/2007/07/23/055878.html> (cit. 02.12.2021).
- [10](3. led. 2020). Airbag / Ceintures de Sécurité - Audi A3 Sportback 1.9 TDI Diesel, [https://www.my-procar.com/garage-et-reparation-auto/airbag-ceintures-de-securite-diesel\\_audi\\_a3-sportback-1-9-tdi-105](https://www.my-procar.com/garage-et-reparation-auto/airbag-ceintures-de-securite-diesel_audi_a3-sportback-1-9-tdi-105), My-ProCar.com, WWW: [https://www.my-procar.com/garage-et-reparation-auto/airbag-ceintures-de-securite--diesel\\_audi\\_a3-sportback-1-9-tdi-105](https://www.my-procar.com/garage-et-reparation-auto/airbag-ceintures-de-securite--diesel_audi_a3-sportback-1-9-tdi-105) (cit. 03.01.2021).
- [11](2019). Airbags- information from IIHS-HLDI on airbags, IIHS-HLDI crash testing and highway safety, WWW: <https://www.iihs.org/topics/airbags> (cit. 02.01.2021).
- [12](2016). Inflatable belts, The Car Seat Lady, WWW: <https://thecarseatlady.com/vehicles/safety-features/inflatable-belts/> (cit. 29.06.2021).
- [13](2019). Ford inflatable seat belts mystery supplier uncovered - no it's not volvo, Motor1.com, WWW: <https://www.motor1.com/news/18669/ford-inflatable-seat-belts-mystery-supplier-uncovered-no-its-not-volvo/> (cit. 29.06.2021).



- [14]O. D'Agostino. (2018). / Primer airbag para peatones, (( La 97 Radio Fueguina )). Section: Tecnología, WWW: <https://www.radiofueguina.com/2014/11/10/primer-airbag-para-peatones/> (cit. 30.06.2021).
- [15]*Zachraňování a vyprošťování z havarovaných vozidel Škoda* : Mladá Boleslav : Škoda Auto, 2018. WWW: <https://az749841.vo.msecnd.net/sitesencom/alv1/3efa3750-df6a-4f5f-92ad-426fcef1cfbdb/rescue-brochure-cs.9611be307008bcba6a2ccf9530e570a0.pdf>.
- [16]B. Miles. (5. lis. 2017). Global polyamide 6,6 market 2017- BASF, asahi kasei, radici group, shenma and dupont - global polyamide 6,6 market 2017 • polyestertime, Polyestertime, WWW: <https://www.polyestertime.com/polyamide-66-market-2017/> (cit. 02.01.2021).
- [17]TECHautoalgerie. (26. červ. 2012). Comment se déploie l'airbag ?, TECHautoalgerie, WWW: <https://techautoalgerie.wordpress.com/2012/06/26/comment-se-deploie-lairbag/> (cit. 03.01.2021).
- [18](2020). Oprava řídicí jednotky vs. její výměna - Profiecu.cz. Section: Řídicí jednotky do auta, WWW: <https://profiecu.cz/oprava-ridici-jednotky/> (cit. 27.08.2021).
- [19](2021). Senzory zrychlení Freescale pro systém jízdní stability ESC | Automatizace.HW.cz, WWW: <https://automatizace.hw.cz/senzory-zrychleni-freescale-pro-system-jizdni-stability-esc> (cit. 14.09.2021).
- [20](2016). What is MEMS Technology?, WWW: [https://www.memsnet.org/mems/what\\_is.html](https://www.memsnet.org/mems/what_is.html) (cit. 14.09.2021).
- [21]W. Fleming, "Overview of automotive sensors", *IEEE Sensors Journal*, roč. 1, č. 4, s. 296–308, pros. 2001, ISSN: 1530437X. DOI: 10.1109/7361.983469. WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/document/983469/> (cit. 14.09.2021).
- [22](2018). Mission | UNECE, WWW: <https://unece.org/mission> (cit. 16.08.2021).
- [23]F. Vlk, *Stavba motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2003, OCLC: 53266590, ISBN: 978-80-238-8757-0.
- [24](2018). (EHK OSN) č. 94 - Předpis Evropské hospodářské komise... | Esipa.cz, WWW: <https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.d11/sb?DR=SB&CP=42018X0178> (cit. 16.08.2021).
- [25](2008). EUR-lex - 42006x1227(04)r(01) - EN - EUR-lex. Doc ID: 42006X12), Doc Sector: 4, Doc Title: Oprava předpisu Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK OSN) č. 114 – Jednotná ustanovení pro schvalování: I. modulů airbagů pro náhradní airbagové systémy; II. náhradních volantů vybavených moduly schváleného typu; III. náhradních airbagových systémů jiných, než které byly instalovány ve volantu ( Úř. věst. L 373, 27.12.2006 ) Doc Type: X Usr\_lan: en, WWW: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A42006X1227%2804%29R%2801%29> (cit. 11.08.2021).
- [26](4. říj. 2019). Average airbag replacement cost in 2021 (you'll be surprised), CarTreatments.com, WWW: <https://cartreatments.com/airbag-replacement-cost/> (cit. 27.08.2021).

- [27](2014). Stejnopis sbírky zákonů České republiky., WWW: [http://ftp.aspi.cz/opispdf/2014.html?fbclid=IwAR2\\_B6hHU9GqFj\\_2Zvsp6-9vIYKGDjiu5M3yZcaGi5k4odQlgFw1f5SQTGY#castka\\_134](http://ftp.aspi.cz/opispdf/2014.html?fbclid=IwAR2_B6hHU9GqFj_2Zvsp6-9vIYKGDjiu5M3yZcaGi5k4odQlgFw1f5SQTGY#castka_134) (cit. 19.08.2021).
- [28](2021). THOR-50m, WWW: <https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/frontal-impact/thor-50m/thor-50m> (cit. 14.09.2021).
- [29](2021). Adult occupant protection | euro NCAP, WWW: <https://www.euroncap.com:443/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/> (cit. 23.09.2021).
- [30]“Road vehicles - Airbag components -Part 2: Testing of airbag modules”, International Organization for Standardization, Geneva, CH, Standard, břez. 1996.
- [31](2013). Zkušebna airbagů vyrostla na zelené louce, WWW: <https://www.tipcars.com/magazin/aktuality/zkusebna-airbagu-vyrostla-na-zelene-louce.html> (cit. 17.10.2021).
- [32](2016). Vetter – Systém portálového jeřábu ErgoLine®: s elektrickým kladkostrojem, nosnost 250 kg | KAISER+KRAFT Česká republika, WWW: <https://www.kaiserkraft.cz/zvedaky/portalove-jeřaby/system-portaloveho-jeřabu-ergoline/s-elektrickym-kladkostrojem-nosnost-250-kg/p/M6399282/> (cit. 21.10.2021).
- [33](2009). Gallery for roller pinions another way to roll the line - curved rack and pinion | curved rack and pinion, design hobby telescopic gear rack micro brass curved rack, roller pinions another way to roll the line, or curved rack for ventilation china manufacturer, made manufacturers suppliers in china worm gear micro, WWW: <https://trading.medianusa.co/> (cit. 23.10.2021).
- [34](2017). Gantries and components, FLT US, WWW: <https://flt-us.com/products/modular-axis-and-gantry-system/> (cit. 27.10.2021).
- [35](2020). 7th axis for robots | Ewellix, WWW: <https://www.ewellix.com/en/global/products/7th-axis-for-robots> (cit. 14.01.2022).
- [36](2021). Serie RX - vertical linear truck with belt drive | hiwin.cz, WWW: [https://www.hiwin.cz/en/products/linear-tracks-for-robots/vertical-tracks/378\\_serie-rx-vertical-linear-truck-with-belt-drive](https://www.hiwin.cz/en/products/linear-tracks-for-robots/vertical-tracks/378_serie-rx-vertical-linear-truck-with-belt-drive) (cit. 10.01.2022).
- [37]“L’usine du futur d’Airbus sera équipée du robot collaboratif OmniRob”, 21.srp. 2014. WWW: <https://www.usinenouvelle.com/article/l-usine-du-futur-d-airbus-sera-equipee-du-robot-collaboratif-omnirob.N279460> (cit. 31.10.2021).
- [38]E. Chakraborty. (2018). Mecanum wheeled robot | 5+ important types of wheeled robots. Section: Science, WWW: <https://lambdageeks.com/mecanum-wheeled-robot-design-applications/> (cit. 02.11.2021).
- [39]peng2016mechanical, “Mechanical design and control system of an omnidirectional mobile robot for material conveying”, *Elsevier*, roč. 56, s. 412–415, 2016.

- [40](2019). Otočné stanice : DS08, WWW: <https://www.mnsystems.cz/manualni-polohovaci-systemy/otocne-stanice/ds08-360-detail> (cit. 03.11.2021).
- [41]J. Kvasnica, *Mechanika*. Praha: Academia, 2004, OCLC: 320491522, ISBN: 978-80-200-1268-5.
- [42](12. pros. 2014). Polohovací jednotka s rolničkovým vedením - ELZ, RAVEO s.r.o. WWW: <https://www.raveo.cz/s-rolnickovym-vedenim-ELZ> (cit. 07.12.2021).
- [43](2003). Profil 80x80E | Alvaris Profile Systems, WWW: <https://www.alvaris.eu/cz/hlinikovy-konstrukcni-system/profilova-rada-8/profil-80x80e> (cit. 28.11.2021).
- [44](2013). Part Number | Ball Rollers - Press Formed, Flange Mount / Threaded Stud | MISUMI | MISUMI MEXICO, WWW: <https://mx.misumi-ec.com/en/vona2/detail/110302279320/?Tab=codeList> (cit. 27.11.2021).