



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Tomáš Moos

**STANOVENÍ DEFORMAČNÍHO CHOVÁNÍ UMĚLE VYTVOŘENÝCH
STRUKTUR POMOCÍ PÁDOVÉ ZKOUŠKY**

Bakalářská Práce

2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K618 Ústav mechaniky a materiálů

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Tomáš Moos

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Stanovení deformačního chování uměle
vytvořených struktur pomocí pádové zkoušky**

Název tématu (anglicky): **Determination of Deformation Behaviour of Artificial
Structures using Drop Test**

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

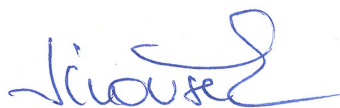
- Zjištění odezvy uměle vytvořených struktur s vysokou mírou porozity na dynamické namáhání má zásadní vliv na návrh těchto struktur jako prostředků pro pohlcení deformační energie. Tyto struktury pak mohou sloužit jako součásti ochranných prvků pro různé typy nárazů (dopravní kolize, ochrana proti projektilům atd.).
- Cílem bakalářské práce je zjištění deformační odezvy (naměření charakteristik ze sensorů a jejich vyhodnocení) uměle vytvořené struktury při rázové zkoušce prováděné v pádové věži.
- Podstatnou částí bakalářské práce bude instrumentace pádové zkoušky v podobě obecně použitelného a rozšiřitelného řešení, které bude využitelné nejen pro experimenty s tímto typem struktur (např. v prostředí LabView).

- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: John Essick: Hands-On Introduction to LabView for Scientists and Engineers, Oxford University Press, 3rd edition, 2015
F. P. Beer, et al: Mechanics of Materials, McGraw-Hill Education, 7th edition, 2014

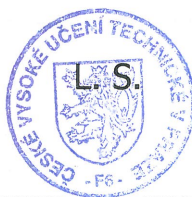
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Zlámal, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **30. října 2015**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **28. srpna 2017**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia




prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu mechaniky a materiálů



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.



Tomáš Moos
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....1. prosince 2016

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji Ing. Petru Zlámalovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultování bakalářské práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia a dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomáši Fílovi za umožnění přístupu k mnoha důležitým informacím a materiálům. Také děkuji projektu v rámci GAČR 15-15480S, za jehož finanční podpory tato práce vznikla. V neposlední řadě je mou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Prohlášení

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

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

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

V Praze dne 19. září 2017

.....

Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

STANOVENÍ DEFORMAČNÍHO CHOVÁNÍ UMĚLE VYTVOŘENÝCH STRUKTUR POMOCÍ PÁDOVÉ ZKOUŠKY

Bakalářská Práce

19. září 2017

Tomáš Moos

ABSTRAKT

- Klíčová slova: padostroj, instrumentace, deformační chování, Labview, kovové pěny

Hlavní náplní bakalářské práce je úprava stávající pádové věže pro bezpečnější, spolehlivější, přesnější a komfortnější zjištění deformační odezvy testovaných vzorků. V rámci úprav je modifikován pádový mechanismus, bezpečnostní prvky, měřící senzory a jejich uchycení. Dále byl přepracován systém vedení kabeláže datových a elektrických vodičů. Pro měření a následné uložení dat je vytvořeno grafické uživatelské rozhraní v prostředí LabView. Pro ověření funkčnosti celkového řešení hardwarové a softwarové části je provedena pádová zkouška na kovové pěně a vyhodnoceny její deformační vlastnosti na základě zaznamenaných dat.

ABSTRACT

- Keywords: drop tower, instrumentation, deformation behaviour, Labview, metal foams

The aim of this study is an improvement of an existing drop testing equipment to achieve safer, more reliable, more precise and straightforward deformation analysis of tested materials. The improvements include a modification of the drop mechanism, introduction of additional safety components, sensors and their attachment to the drop tower. An architecture of both data acquisition circuitry and power cables wiring are extensively re-arranged. A new application based on LabView toolkit was created to process and store the experimental data. The modified drop test setup (hardware and software) is evaluated using testing of aluminium metal foam samples. Measured data are used to determine the deformation behaviour of tested structures.

Obsah

1 ÚVOD	9
2 TEORETICKÝ ÚVOD	11
2.1 Testovací zařízení padostroj	11
2.2 Porovnání padostroje s jinými metodami pro měření deformace	11
2.2.1 Univerzální testovací zařízení	12
2.2.2 Charpyho kladivo	12
2.2.3 Dělená hopkinsonova kompresní tyč	13
2.3 Teorie rázové zkoušky	13
2.3.1 Princip rázové zkoušky v padostroji	13
2.3.2 Přímě měřené veličiny	14
2.3.3 Odvozené veličiny	14
2.4 Princip funkce použitých senzorů a výpočetních metod	16
2.4.1 Akcelerometr	16
2.4.2 Vysokorychlostní kamera	17
2.4.3 2D Digitální korelace obrazu	18
2.4.4 Rotační snímač polohy	18
2.4.5 Impaktní piezo-siloměr	19
2.4.6 Snímač pro synchronizaci záznamu měřených signálů	20
2.5 Způsob vyčítání měřených dat ze senzorů	21
2.5.1 Softwarové prostředí Labview	21
3 Úprava instrumentace padostroje na Ústavu mechaniky a materiálu	23
3.1 Stav padostroje před úpravou	23
3.1.1 Původní koncepce padostroje	23
3.1.2 Vypouštěcí mechanismus	24
3.1.3 Ochrana kabeláže	24
3.1.4 Synchronizace signálů	24
3.1.5 Prostředí Labview	25
3.2 Úprava padostroje	25
3.2.1 Úprava mechanických částí padostroje	25
3.2.2 Úprava softwaru	33

4	Ověření funkčnosti upraveného padostroje pomocí pádové zkoušky a stanovení deformačního chování vzorku kovových pěn	35
4.1	Příprava vzorků pro experiment	35
4.1.1	Vlastnosti kovových pěn	35
4.1.2	Vlastnosti vzorků	36
4.2	Popis experimentu pro test kovových pěn	37
4.3	Naměřená data z pádové zkoušky kovových pěn	38
4.4	Výsledky experimentu	41
5	Závěr	44
6	Zdroje a použitá literatura	45
7	Seznamy použitých prvků	47

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

symbol	jednotka	veličina
a	$[ms^{-2}]$	Zrychlení impaktoru
A	$[m^2]$	Plocha průřezu testovaného vzorku
E_k	[J]	Kinetická energie
E_p	[J]	Potenciální energie
F	[N]	Síla
g	$[ms^{-2}]$	Tíhové zrychlení
h	[m]	Poloha impaktoru
m	[kg]	Hmotnost
n_x	[-]	Porozita
P	[Bar]	Tlak
s	[m]	Výška testovaného vzorku
S	[m]	Plocha senzoru
t	[s]	Čas
U	[V]	Elektrické napětí
v	$[ms^{-1}]$	Rychlost impaktoru
v_d	$[ms^{-1}]$	Dopadová rychlost impaktoru
V	$[m^3]$	Objem vzorku
V_p	$[m^3]$	Objem pevné složky
ε	[-]	Deformace (poměrné prodloužení)
λ	[Pa]	Hustota deformační energie
ξ	$[Jm^{-3}A^{-1}]$	Citlivost napětí na krystal
ρ_p	$[kgm^{-3}]$	Hustota pevné složky
σ	[Pa]	Mechanické napětí

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

zkratka	popis
<i>SGS</i>	Studentská grantová soutěž
<i>UTM</i>	Univerzální testovací zařízení (Universal testing machine)
<i>SHPB</i>	Dělená hopkinsonova kompresní tyč (Split Hopkinson pressure bar)
<i>DIC</i>	Digitální korelace obrazu (Digital image correlation)
<i>PE</i>	Piezoelektrický (Piezoelectric)
<i>MEMS</i>	Mikroelektronický mechanický systém (Microelectromechanical systems)
<i>VC</i>	Variabilní kapacitní (Variable capacitor)
<i>PR</i>	Piezoresistivní (Piezoresistive)
<i>2D</i>	Dvourozměrný / plošný (Two-dimensional)
<i>TTL</i>	Tranzistorově-tranzistorová logika (Transistor-transistor logic)
<i>AC</i>	Střídavé napětí (Alternating current)
<i>DC</i>	Stejnoseměrné napětí (Direct current)
<i>E – Stop</i>	Nouzový vypínač (Emergency stop)
<i>NI</i>	National Instruments
<i>USB</i>	Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
<i>SG – filter</i>	filtr Savitzky-Golay (Savitzky–Golay filter)

1 ÚVOD

V rámci projektů Ústavu mechaniky a materiálu vznikla potřeba testování materiálů se schopností absorbovat velké množství kinetické energie. Míra pohlcení deformační energie je závislá na schopnosti materiálu trvale (plasticky) se deformovat. Tato vlastnost je velmi ceněná v dopravě, kde se s potřebami pohltit takovéto energie často setkáváme. V dopravních aplikacích je časté dynamické zatížení s různými rychlostmi deformace, proto je nutné materiály za těchto podmínek testovat. Pro testování vzorku za nízkých až středních rychlostí deformace je vhodným zařízením např. pádová věž (padostroj). Slibnými materiály pro tento účel se jeví být tzv. kovové pěny, které mají relativně velké absorpční schopnosti deformační energie, při zachování jejich nízké hmotnosti, třebaže dosud v dopravních aplikacích (infrastruktura, vozidla atd.), kvůli vysoké výrobní ceně, není jejich použití časté. Využití těchto materiálů v dopravě lze například jako bezpečnostních prvků v případě dopravní nehody, tlumení hluku nebo snížení hmotnosti dopravních prostředků [1] [2].

Podmínky vznikající při nárazech v dopravních aplikacích je nutné pro účely studia a vývoje pokročilých materiálů umět simulovat v laboratorním prostředí. Jedno ze zařízení, které umožňuje pozorovat a měřit tyto děje může být instrumentovaný padostroj. Padostroj na Ústavu mechaniky a materiálu byl navržen pro testování cyklistických přileb dle diplomové práce [3], v rámci projektu SGS, uskutečněné v minulých letech. Po dokončení projektu, vznikla potřeba na inovaci stávajícího padostroje tak, aby zařízení fungovalo spolehlivěji, bezpečněji a bylo komfortnější na obsluhu. Navíc stávající padostroj neumožňoval provádění materiálových zkoušek, umožňoval pouze testy ochranných přileb (testovaný objekt bylo možné umístit pouze na pojízdnou klec). Hlavní myšlenkou úprav bylo vytvoření vhodnějšího zařízení pro provádění rázových zkoušek, nízkou až středně velkou rychlostí deformace, pro materiály zkoumané v rámci projektových prací na ústavu (např. kovové pěny, auxetické materiály atd.). Mimo materiálové testování bylo pamatováno i na zachování možnosti testování prvků pasivní bezpečnosti v dopravě (např. ochranné cyklistické a motocyklové helmy, části nárazníků atd.). Stávající padostroj tyto požadavky splňoval pouze v omezené míře.

V rámci úpravy padostroje bylo cílem také rozšířit počet přímo měřitelných veličin, ze kterých lze poté detailněji stanovit vlastnosti testovaného materiálu. Z tohoto důvodu bylo nutné rozšířit stávající počet senzorů a díky jejich rozdílnosti bylo nutné zajistit v sestavě padostroje vhodné úrovně řídicích a zdrojových napětí. Tuto skutečnost je proto nutné funkčně řešit. Mimo funkční

rozšíření padostroje o měřicí senzory, bylo nutné řešit bezpečnost (vyšší míra rizika je způsobena pohyblivými částmi padostroje), ať již z pohledu ochrany zdraví, obsluhy nebo ochrany měřicí techniky a kabeláže. V rámci modifikace byl tento aspekt řešen s vysokou prioritou a všechna navržená řešení byla provedena s důrazem na bezpečnost. Navržené hardwarové inovace vyžadují odpovídající rozšíření softwaru o nové datové a řídicí kanály. S tímto je spjata i potřeba rozšíření ovládacího rozhraní. Vhodným softwarem pro nastavení parametrů měření, záznam a zpracování dat z výstupních senzorů mohou být např. softwary využívající vizuálního programovacího jazyka (např. software Labview).

2 TEORETICKÝ ÚVOD

2.1 Testovací zařízení padostroj

Padostroj je zařízení pro dynamické deformační zkoušky objektů různých struktur a materiálů, schopné vyvinout deformaci ve vzorku o nízké až střední rychlosti zatížení. Lze ho použít pro simulaci deformačních dějů vznikajících např. v dopravních aplikacích (testy odolnosti např. ochranných přileb, nárazníků, svodidel) nebo obecně k libovolné zkoušce materiálů či struktur zkoumaných v závislosti na dopadové energii či rychlosti.

Padostroj funguje na principu deformace způsobené volným pádem v zemském gravitačním poli. Údaje o chování vzorku při deformaci jsou získávány ze soustavy senzorů, kterými je padostroj osazen. Z naměřených signálů lze pak jejich analýzou určit deformační vlastnosti zkoumaného materiálu. Tyto vlastnosti se získávají za účelem např. určení nejvhodnějšího materiálu pro danou aplikaci, pro zjištění zda daný materiál splňuje požadované normy pro daný účel, nebo ke studiu deformačního chování nového materiálu či struktury.

V praxi se používá velké spektrum technických provedení pádových věží. Základní rozdělení je dle umístění deformovaného vzorku. Prvním způsobem provedení je vypuštění vzorku z určité výšky na údernou plochu. Tímto způsobem se testují např. odolnosti ochranných obalů pro transport nárazu náchylného zboží, kde se měří poškození uvnitř vzorku. Druhým způsobem je vypuštění impaktního závaží z určité výšky na vzorek. Výhodou tohoto provedení je kontrolovatelnější rychlost a celková velikost deformace. Nevýhodou je složitější konstrukční provedení. Tato metoda se užívá např. ve výzkumu k zjištění deformačních vlastností zkoumaného materiálu. Mimo sériově vyráběné padostroje existují také prototypy, které jsou vyvíjeny pro specifické účely. Příkladem takového padostroje je např. původní padostroj na Ústavu mechaniky a materiálů, který byl vyvinutý speciálně pro testování cyklistických přileb.

2.2 Porovnání padostroje s jinými metodami pro měření deformace

Deformační zkoušky můžeme rozdělit do 3 kategorií, dle rychlosti deformace:

- 1) kvazi-statické rychlosti ($\leq 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) – např. univerzální testovací zařízení nebo zatěžovací stolice
- 2) pro nízké až střední rychlosti ($10^{-1} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$) – např. padostroj nebo Charpyho kladivo
- 3) pro vysoké rychlosti ($10^2 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$) – např. dělená Hopkinsonova kompresní tyč

Jednotlivé zkušební metody se liší svojí podstatou a provedením. Různé deformační zkoušky poskytují rozdílné spektrum údajů o testovaných vzorcích. Každá zkušební metoda je odlišná a produkuje relevantní výsledky pro dané rozmezí rychlosti deformace. Kombinací těchto metod lze získat komplexnější přehled o chování materiálu.

2.2.1 Univerzální testovací zařízení

Univerzální testovací zařízení (UTM - universal testing machine) je zařízení pro kvazi-statické deformační děje. Zařízení mechanicky namáhá vzorek např. tahem, tlakem nebo ohybem. Tyto děje probíhají pomalu, aby se minimalizoval dynamický účinek. Měřené veličiny jsou síla v závislosti na prodloužení vzorku. Z těchto veličin lze určit další škála vlastností materiálu jako je například mez pevnosti, tažnost nebo kontrakce. Rozdíl této metody oproti padostroji je v samotném typu zkoušky, při kvazi-statických dějích se materiál testuje, buďto v závislosti na rychlosti zatěžování v naprosto odlišných podmínkách (čas trvání deformace je o jednotky řádů vyšší) nebo se v závislosti na rychlosti zatěžování netestuje vůbec.

2.2.2 Charpyho kladivo

Charpyho kladivo patří do stejné kategorie zařízení, pro provádění deformačních zkoušek malou až střední dopadovou rychlostí, jako padostroji. Charpyho kladivo je v principu kyvadlo, které se používá k přerážení vzorků v ohybu, typicky vzorků s vrubem pro stanovení vrubové houževnatosti. Konstrukčním rozdílem je, že Charpyho kladivo používá místo přímočarého pohybu impaktoru, pohyb po kružnici. Toho se využívá především pro přesné zjištění energie potřebné pro přeražení vzorku. Jelikož se kladivo po přeražení vzorku dále pohybuje, dá se tato energie získat z odečtení potenciální energie výchozí s potenciální energií výslednou (energie v bodě kam kladivo vystoupá). Nevýhody Charpyho kladiva oproti padostroji jsou zejména špatně definované počáteční podmínky experimentu, tudíž jsou obtížně vyhodnotitelné materiálové vlastnosti jiné než energie potřebná pro přeražení vzorku. Dalšími nevýhodami jsou například, že vzorek musí být přesně umístěn v definované poloze, musí mít přesně dané rozměry a vzhledem ke kladivu musí být i dostatečně malý (musí se vejít do čelisti kladiva). Nevýhodou také může být obecně nižší maximální dopadová rychlost, která je dána nutností kompenzovat odstředivou sílu, při pohybu impaktoru po kružnici. Odstředivá síla roste kvadraticky s poloměrem kružnicové dráhy impaktoru.

2.2.3 Dělená hopkinsonova kompresní tyč

Dělená hopkinsonova kompresní tyč (SHPB - Split Hopkinson Pressure Bar) je metoda fungující na principu dynamické deformační zkoušky pro vysoké rychlosti. Zařízení se skládá ze dvou tyčí mezi kterými je umístěn vzorek. V jedné tyči (incidentní) se vytvoří napěťová vlna pomocí projektilu (tzv. strikeru). Striker je krátká tyč (dlouhá typicky od 50 mm do 500 mm). Strikeru se udělí rychlost např. vystřelením ze vzduchového děla pomocí stlačeného plynu. Striker poté narazí do incidentní tyče a vytvoří tak pulz. Tím se na začátku tyče vytvoří napěťová vlna, která se šíří v tyči směrem ke vzorku. Po dosažení vzorku se část vlny odrazí zpátky do incidentní tyče, zatímco zbytek vlny prochází skrz vzorek a následně do tyče za ním, což způsobuje deformaci vzorku. Hlavní rozdíl SHPB oproti padostroji je ve způsobu přenosu deformační energie. U padostroje se používá přímého působení impaktoru na vzorek. U SHPB se energie přenáší přes incidentní tyč, elastickou deformační vlnou. Další rozdíl je v rychlosti deformace, která je u SHPB mnohem vyšší, což je způsobeno rozdílnou metodou získání a vedení deformační energie ke vzorku. Padostroj využívá metody volného pádu v gravitačním zemském poli. U této metody není možné dosáhnout vysokých dopadových rychlostí (kvůli výšce věže a odporu vzduchu). Nevýhodou SHPB oproti padostroji je omezení velikosti testovaného vzorku, které se pohybuje v řádech jednotek mm.

2.3 Teorie rázové zkoušky

2.3.1 Princip rázové zkoušky v padostroji

Způsobů provedení rázové zkoušky je několik, jejich princip je však podobný. Potencionální energie impaktoru E_p lze vypočítat pomocí vztahu:

$$E_p = \int_{h_1}^{h_2} F \cdot dh = \int_{h_1}^{h_2} mg \cdot dh = mgh_2 \quad (1)$$

Závaží impaktoru o hmotnosti m je vyzvednuto do určité polohy h_2 , kde je upevněno. Závaží je poté uvolněno a padá volným pádem (idealizovaný případ), z dané výšky h_2 na vzorek testovaného materiálu, který je umístěn v dané výšce h_1 . Na závaží působí tíhové zrychlení g , které je konstantní. Potencionální energie se postupně mění na kinetickou energii $E_k(t)$:

$$E_k(t) = F(t) \cdot [h_2 - h(t)] = m \cdot a(t) \cdot [h_2 - h(t)] = \frac{1}{2}m \cdot a(t)^2 \cdot t^2 = \frac{1}{2}m \cdot v(t)^2, \quad (2)$$

kde hodnota t je aktuální čas, $v(t)$ je aktuální rychlost, $a(t)$ je aktuální zrychlení, $h(t)$ je aktuální

výška a $F(t)$ je síla působící na impaktor. V průběhu pádu se všechna potenciální energie E_p změní na kinetickou energii E_k a lze stanovit dopadovou rychlost impaktoru při dopadu na vzorek:

$$E_p = E_k = mgh_2 = \frac{1}{2}mv_d^2 \Rightarrow v_d = \sqrt{2gh_2}, \quad (3)$$

kde v_d je hodnota rychlosti prvního kontaktu impaktoru na vzorek. V reálných podmínkách zkoušky je malá část energie ztracena (z důvodu tření v mechanismu zařízení a odporu vzduchu na závaží), avšak tato ztráta není při výpočtu uvažována. Kinetická energie je v průběhu deformace absorbována testovaným vzorkem. Míra pohlcení energie se dá určit např. pomocí hustoty deformační energie, která je stanovena jako:

$$\lambda = \int \sigma(\varepsilon) \cdot d\varepsilon, \quad (4)$$

kde σ je mechanické napětí a ε je poměrná deformace.

2.3.2 Přímé měřené veličiny

Padostrojem přímo měřené veličiny jsou zobrazeny v následující tabulce:

Tabulka 1: Veličiny, které jsou přímo měřitelné v sestavě instrumentovaného padostroje

měřená veličina	popis	metoda měření
F [N]	síla působící na vzorek (umístěný na podložce)	impaktní siloměr
a [ms ⁻²]	zrychlení impaktoru	akcelerometr
h_2 [m]	inicializační výška impaktoru	rotační/laserový snímač polohy
m [kg]	hmotnost impaktoru	zvážením impaktoru
A [m ²]	plocha průřezu testovaného vzorku	změřením vzorku před testem
s_0 [m]	původní výška testovaného vzorku	změřením vzorku před testem

2.3.3 Odvozené veličiny

Aktuální rychlost impaktoru od prvního kontaktu (nárazu) se vzorkem $v(t)$ se získá pomocí určitého integrálu funkce zrychlení $a(t)$ [4]:

$$v(t) = v_d + \int_{t_0}^t a(t) \cdot dt \quad (5)$$

kde t_0 je čas nárazu impaktoru do vzorku, tedy čas vychýlení aktuální hodnoty zrychlení od normálního zemského zrychlení a t je aktuální čas. Jako integrační konstanta je použita dopadová rychlost impaktoru na vzorek v_d dle rovnice 3. Aktuální posunutí dopadové roviny vzorku od prvního kontaktu se vzorkem $s(t)$ se určí pomocí integrálu funkce rychlosti $v(t)$ [4]:

$$s(t) = s_{\text{ref}} + \int_{t_0}^t v(t) \cdot dt \quad (6)$$

Hodnoty integračních mezí t_0 a t jsou stejné jako u rovnice 4. Integrační konstanta s_{ref} je rovna nule (vzdálenost od místa dopadu impaktoru k referenční hodnotě). Aktuální výšku vzorku v průběhu zatěžování lze pak stanovit:

$$h_{\text{vz}}(t) = s_0 - s(t) \quad (7)$$

Maximální dosažené posunutí horní roviny vzorku nastává v čase konce rázu. Aktuální poměrnou deformaci $\varepsilon(t)$ lze získat podílem celkové dráhy impaktoru a původní výšky testovaného vzorku:

$$\varepsilon(t) = \frac{s(t)}{s_0} \quad (8)$$

Funkce průběhu síly v čase působící na vzorek $F(t)$ lze za pomoci I. Newtonova zákona zapsat:

$$F(t) = ma(t), \quad (9)$$

kde $a(t)$ je funkce průběhu zrychlení v čase od nárazu impaktoru na vzorek a m je hmotnost impaktoru.

Mechanické napětí v tahu $\sigma(t)$ – lze získat podílem funkce průběhu síly v čase působící na vzorek $F(t)$ a průřezem testovaného vzorku A :

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A} \quad (10)$$

Je nutné dodat, že určování síly a dráhy z naměřených dat pomocí akcelerometru je zatíženo množstvím chyb, jelikož při experimentu není zaručen kvalitní kontakt mezi impaktorem a vzorkem (impaktor vibruje, opěrné plochy vzorku nejsou ideálně planoparalelní atd.). Dráhu vykonanou impaktorem od místa nárazu lze přesněji získat např. pomocí optických metod s využitím

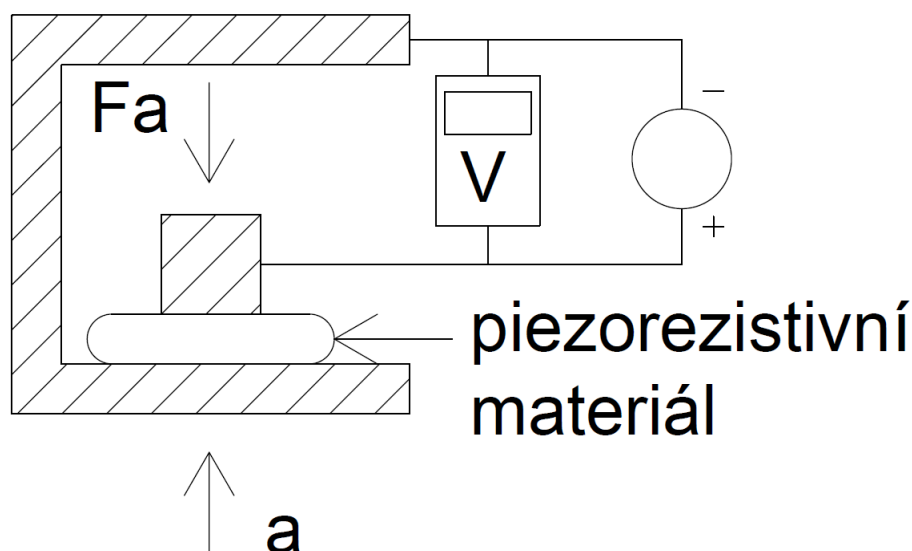
záznamu rychloběžné kamery a techniky digitální korelace obrazu (DIC - Digital image correlation). Sílu působící na vzorek F lze pak získat přímo měřením např. pomocí impaktního siloměru.

2.4 Princip funkce použitých senzorů a výpočetních metod

2.4.1 Akcelerometr

Akcelerometr je zařízení, které je schopné měřit relativní zrychlení vůči normálnímu zemskému zrychlení, které je rovno přibližně $9,81 \text{ ms}^{-2}$ a označuje se jako g . V praxi se v akcelerometrech obvykle používají piezoelektrické, piezorezistivní a kapacitní součásti pro převedení mechanického pohybu na elektrický signál.

PE (piezoelektrický) akcelerometr je zařízení s vysokou přesností, trvanlivostí, velkým dynamickým rozsahem, snadnou instalací a dlouhou životností. Obecný PE akcelerometr používá vnitřní PE prvek spojený s pohyblivou hmotou a vytváří tak pružinu s jedním stupněm volnosti. Okamžitá změna napětí na vnitřním PE prvku vytváří náboj na výstupních svorkách akcelerometru, který je úměrný použitému zrychlení dle obr. 1. Typická citlivost PE akcelerometru je $0,5$ až 1000 pCg^{-1} . PE akcelerometry mohou být použity i pro měření vibrací v rozmezí od 4 g do 104 g [5].



Obrázek 1: schéma piezorezistivního akcelerometru

Moderní akcelerometry s mikročipy se označují zkratkou MEMS (mikroelektronický mechanický systém). MEMS se vztahuje na jakýkoliv snímač, vyrobený pomocí mikroelektronických výrobních technik. V současné době jsou běžně používané MEMS typu VC (Variabilní kapacitní) a PR (Piezoresistivní) [6].

VC akcelerometry jsou snímače s nízkým rozsahem a vysokou citlivostí, používané pro strukturální měření akcelerace nebo pro konstantní akceleraci. VC akcelerometr se skládá z mikroprocesované zkušební hmoty, což je obvod, se dvěma vstupními a výstupními svorkami, schopný měřit frekvenční rozdíl střídavého napětí mezi nimi. Zkušební hmota je volně zavěšena k prstencovému rámu mezi dvěma paralelními deskami. Tato konfigurace vytváří dvě vzduchové mezery mezi horní, dolní deskou a zkušební hmotou. Zmíněné uspořádání se chová jako dva kondenzátory. V případě, že se při zrychlení, zkušební hmota pohybuje, jedna vzduchová mezera se snižuje a druhá zvyšuje. Vytváří tak změnu kapacity úměrné akceleraci [6].

PR akcelerometry jsou zařízení s vyšším rozsahem a nízkou citlivostí, které se používají v aplikacích, kde dochází k šokovému zatížení nebo zatížení od výbuchu. Snímací prvky v akcelerometrech PR se skládají ze tří plátů, sendvičově uspořádaných. Ohyb probíhá na dvou plíščích vložených vně středního plátu. Ohýbání těchto plíščů způsobuje měřitelnou změnu odporu, která je úměrná aktuálnímu zrychlení. Pro změnu měřicího rozsahu je nutná změna tuhosti plíščů nebo změna jejich seizmické hmotnosti [6]. Pro rázovou zkoušku je nejvhodnější typ PR.

2.4.2 Vysokorychlostní kamera

Vysokorychlostní kamera je zařízení schopné zaznamenávat obraz s hodnotou expozice kratší než 1/1000 sekundy nebo vyšší hodnotou rámcové rychlosti snímání než 250 snímků za sekundu [7]. Vysokorychlostní záznam se používá pro různé účely v průmyslových, vědeckých nebo vojenských aplikacích, kde je nutno pořídit optický záznam rychlého děje a ten dále zpracovat. V průmyslu se užívá například pro sledování crash testů, v armádě pro zjištění účinku a průběhu exploze. V případě sestavy instrumentovaného padostroje na Ústavu mechaniky a materiálů se záznam rychloběžné kamery používá, pro záznam deformačního děje a následné vyhodnocení deformace vzorku pomocí DIC [8].

2.4.3 2D Digitální korelace obrazu

2D digitální korelace obrazu (2D–DIC) je metoda analýzy obrazu pro získání posunutí a deformace vzorku materiálu na celé snímané ploše. K této metodě je nutné použít zařízení (pro dynamické děje obvykle rychloběžnou kameru) pro pořízení dostatečného množství snímků v závislosti na velikosti a rychlosti posunu. Jelikož je posun vzorku určován z po sobě jdoucích snímků, je nutné zvolit frekvenci snímání s ohledem na rychlost deformačního děje. V případě zkoušky v padostroji je pro snímání využita rychloběžná kamera. Prvním krokem metody 2D-DIC je vyznačení mřížky bodů na referenčním obrázku (první snímek s nedeformovaným vzorkem), jejichž pohyb se bude sledovat skrze zatěžovací stavy (následné snímky). Poté se definují malé oblasti se středy v bodech mřížky tzv. subsety. Následně jsou vypočteny jejich korelační koeficienty v referenčním i ve všech následných snímkách. Korelační koeficienty (míra podobnosti), se určují na základě stupňů šedi a jasu (světelné intenzity) jednotlivých pixelů. Protože přesná poloha referenčních bodů v následných snímkách není známa, hledají se pomocí posunu subsetů o malou vzdálenost (pixel) v definovaných oblastech tzv. offsetech. Tím vznikne matice korelačních koeficientů pro každý offset v každém následném snímku. Jako posunuté referenční body jsou označeny body, které maximalizují danou kriteriální funkci. Důležitým faktorem je náročnost výpočtů, která je dána velikostí subsetů a offsetu, počtem hledaných bodů (velikostí mřížky) a typem algoritmu použitým pro nalezení subsetů v následujících snímcích [9].

2.4.4 Rotační snímač polohy

Rotační snímač polohy (enkodér) je zařízení, které dokáže zachytit počet otáček hřídele. V praxi se využívá nejčastěji principu detekce pomocí kruhového pásu, který obsahuje velké množství po sobě jdoucích střídajících se detekovatelných prvků. Pás s prvky je připevněn k rotující hřídeli naproti detektoru, který je umístěn na nepohyblivé části zařízení. Prvky jsou buďto dvou pravidelně střídajících se typů nebo jednoho typu umístěného s mezerami mezi sebou. Při otáčení detektor prvky sčítá. Součet prvků je ekvivalentní aktuálnímu úhlu natočení hřídele. U těchto typů snímačů je přesnost dána počtem pulzů (jedné změny prvku) za otáčku. Rozlišení snímače se rovná úhlové hodnotě jednoho pulzu. Jako prvky se nejčastěji používají magnetické pásy se střídavým pólováním nebo pásy se optickými prvky umístěnými s mezerami mezi sebou.

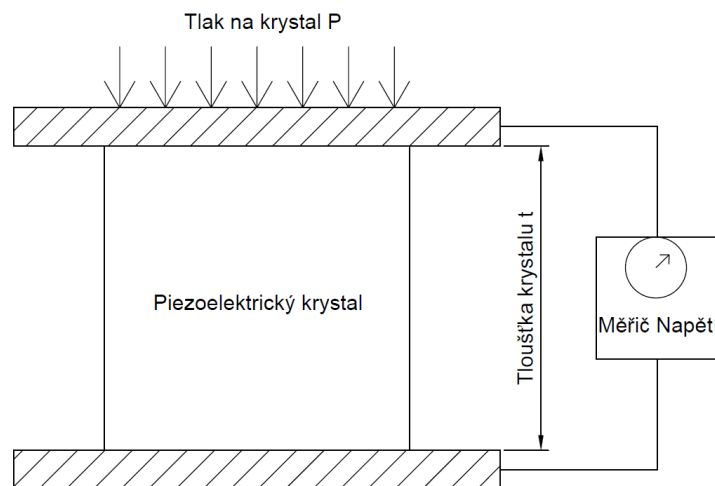
2.4.5 Impaktní piezo-siloměr

Impaktní piezo-siloměr je zařízení schopné měřit hodnotu síly působící na plochu senzoru S . Zatížení působící na plochu senzoru je tlak P . Zařízení tento tlak přepočítává na sílu F :

$$F = P \cdot S \quad (11)$$

Tlak na piezoelektrický krystal, způsobuje změnu napětí ΔU , která se projeví jak citlivost napětí na krystal ξ [10]:

$$\Delta U = \xi \cdot t \cdot P \quad (12)$$



Obrázek 2: schéma impaktní piezo siloměru

Důležitou vlastností impaktních siloměrů je jejich frekvenční odezva, která značí frekvenci rozkmitání krystalu při deformaci. Pokud se frekvence měřené deformované soustavy blíží k frekvenční odezvě, jsou naměřené hodnoty nepřesné. Impaktní piezo-siloměry obsahují krystal, který se při velkém zatížení deformuje jen velmi málo a jeho frekvenční odezva dosahuje vysokých hodnot. Typický piezoelektrický snímač se při síle 10 kN vychýlí pouze o 0,001 mm s frekvenční odezvou až 100 kHz. Výhoda vysoké tuhosti je, že krystal neovlivňuje výsledek měření vlastní deformací a dá se použít i pro měření nepružných materiálů (např. kovů). Výhodou vysoké frekvenční odezvy je také, že činí senzor velmi rychlý a citlivý k nízkým hodnotám zatížení, dokáže také detekovat i nepatrné změny síly. Tento typ siloměru však není vhodný pro kvazi-statické (pomalu se měnících) měření. V nabíjecím zesilovači existuje malý

únik náboje, což způsobuje tzv. drift signálu. To způsobuje nepatrné odchylky v průběhu měření, proto je možné tyto siloměry používat jen několik minut až hodinu [11].

2.4.6 Snímač pro synchronizaci záznamu měřených signálů

Výstupy z jednotlivých sensorů mohou být vyčítány odlišnými měřicími kartami. Aby bylo možné signály časově synchronizovat, je obvykle používán pro začátek pořizování záznamu tzv. trigger. Sensor pro triggování je zpravidla řešen tak, aby vygeneroval pulz (nejčastěji v TTL standardu) v okamžiku počátku měřené události. K tomuto účelu se používají spínací či rozpínací senzory. Jsou to senzory schopné automatického sepnutí či rozepnutí v počátku události. Trigger se používá k synchronizovanému spuštění či ukončení záznamu jednotlivých sensorů. Senzory pro triggování jsou založeny na různých fyzikálních způsobech, nejčastěji se využívá indukčního či optického principu.

Indukční snímač je často užívaným snímačem pro triggování. Je tvořen oscilátorem, který se skládá z rezonančního obvodu, paralelně zapojené cívky a kondenzátoru. Oscilátor generuje vysokofrekvenční střídavý proud, který při průtoku cívkou vytváří magnetické pole. Při přiblížení elektricky vodivého materiálu do blízkosti tohoto magnetického pole dojde k jeho deformaci. To se projeví útlumem kmitů oscilátoru nebo oscilátor kmitat přestane. Tato deformace je způsobená vířivými proudy indukující se v clonícím el. vodivém objektu. Tento objekt působí svou indukčností zpátky na cívku oscilátoru, kde změní její impedanci. Tyto změny jsou, ale na velké vzdálenosti jen málo patrné, k větším změnám dojde až ve vzdálenosti řádově desítek mm [12]. Tato vlastnost způsobuje nespolehlivost senzoru, pokud se pohyblivá clona, vlivem nesymetričnosti zařízení, nedostane dostatečně blízko, nevznikne tak potřebná detekce. Indukční snímače nejsou tedy považovány za plně bezkontaktní.

Optické brány jsou jednoduchým senzorem pro triggování, využívající optiky. Fungují na principu emise a následné detekce úzkého paprsku el. magnetického záření (nejčastěji ve frekvenčním rozsahu odpovídající viditelnému světlu nebo v jeho blízké oblasti). Optické brány reagují na přerušení paprsku clonou mezi jeho vysílačem a přijmačem. Mohou se skládat buďto ze dvou zařízení (vysílače a přijmače) nebo pouze z jednoho snímače implementující vysílač i přijmač (využívajícího odrazu paprsku od clony). Nevýhodou odrazové metody je kratší dosah a případná nutnost použití reflexní destičky. Senzory se dále odlišují typem emitovaného el. magnetického záření. Typ záření se projeví na dosahu a rozptylu (tolerance vychýlení přijmače

a vysílače z jedné roviny) detekce, ale i na ceně snímače. V praxi se používají 3 typy [13]:

1) červené bodové světlo, nejčastější typ má dosah jednotky až desítky metrů, veliký rozptyl a nízká cena

2) infračervené záření, podobné parametry jako červené světlo menší náchylnost k rušení (např. od slunečního světla), vyšší cena

3) laserové viditelné světlo, dosah desítky až stovky metrů, velmi nepatrný rozptyl, vyšší pořizovací cena

Výhodnou optických bran oproti indukčním snímačům je jejich dosah a schopnost detekce nevodivých materiálů. Díky tomu je jejich spolehlivost pro detekci průchodu výrazně vyšší.

2.5 Způsob vyčítání měřených dat ze senzorů

Veškeré senzory potřebují spolehlivý software pro vyčítání a ukládání jejich výstupních signálů. K tomuto účelu lze např. využít prostředí Labview. Výhodou tohoto prostředí je jeho široká podpora u výrobců specializovaného měřicího vybavení.

2.5.1 Softwarové prostředí Labview

Softwarové prostředí Labview (Laboratory Visual Instrument Engineering Workbench) je platformou pro návrh systému a uživatelského prostředí ve vizuálním programovacím jazyce G, vytvořené a vyvíjené společností National Instruments. Programovací jazyk G je řazen do kategorie jazyků datového toku. V tomto typu jazyka programátor spojuje jednotlivé bloky (části tvořené zdrojovým kódem) a funkce nimi tvořené do diagramů, pomocí výkresových vodičů. Blokům a funkcím se říká uzly a mohou obsahovat různý počet vstupů a výstupů. Signál je po spuštění veden pomocí vodičů skrz uzly. Každý uzel je aktivován (okamžik, kdy vyšle proměnné na výstup), jakmile má k dispozici všechny vstupní hodnoty. Program Labview vytváří tzv. virtuální nástroje (soubory VI). Tyto VI programy se skládají ze tří komponent: blokového diagramu, předního uživatelského panelu a zadního panelu. Blokovaný diagram obsahuje zdrojový kód daného programu. Přední uživatelský panel je sestaven z ovládacích prvků a indikátorů, které dohromady tvoří uživatelské prostředí programu. Po spuštění VI programu se zobrazí

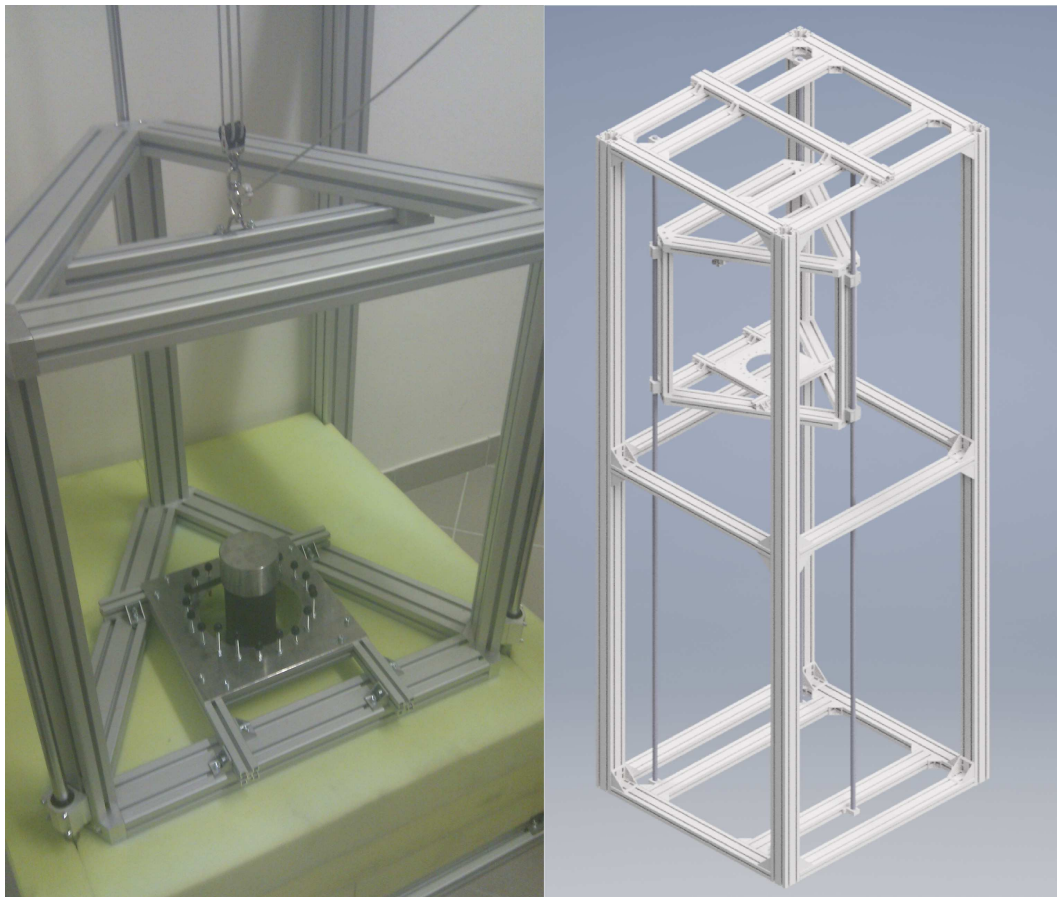
právě přední uživatelský panel, který je zpravidla navržen tak, aby byl uživatelsky přívětivý (aby ho dokázaly používat i uživatelé bez programátorských zkušeností). Zadní panel obsahuje informace o funkcích, vstupech a výstupech programu a je určen k propojení jednotlivých VI programů mezi sebou.

3 Úprava instrumentace padostroje na Ústavu mechaniky a materiálu

3.1 Stav padostroje před úpravou

3.1.1 Původní koncepce padostroje

Testovací zařízení bylo původně navrženo pouze pro testování ochraných přileb (motocyklistických a cyklistických) [1]. Původní stav konstrukce obsahoval nosný rám s pohyblivou klecí. Ve spodní části klece byla umístěna deska se stávajícími šrouby, kterými se usazovala maketa hlavy s přilbou. Akcelerometr byl usazen v těžišti makety hlavy. Spodní část byla tvořena dopadovou kovadlinou. Klec byla zvedána na kladce přes ruční naviják. Původní stav je zobrazen na obr. 3.



Obrázek 3: vlevo: původní klec se šrouby pro usazení makety hlavy, bez jištění, vpravo: vizualizace původního padostroje

Na původní verzi padostroje byla provedena první úprava ještě před modifikací, které se věnuje

tato práce. Úpravy byly provedeny za účelem možnosti testování materiálových vzorků. V upraveném padostroji mohl být vzorek umístěn na kovadlině a do klece byl umístěn impaktor osazený akcelerometrem.

3.1.2 Vypouštěcí mechanismus

Původní odhazovací mechanismus byl proveden pomocí lodního šeklu (vytahovacího čepu). Pro uvolnění pohyblivé klece s maketou hlavy bylo nutné vytáhnout čep manuálně (přes lanko) obsluhou. Obsluha k uvolnění musela použít žebřík, protože se impaktor nacházel zpravidla v nejvyšší poloze. Toto řešení bylo nevyhovující z důvodu bezpečnosti, časové náročnosti a nebylo příliš komfortní. Při mechanickém vytažení čepu mohlo dojít k nežádoucímu rozkmitání klece. Protože se závaží dalo do pohybu hned po vytažení čepu, obsluha musela stát vedle stroje na žebříku a hrozilo tak zvýšené nebezpečí úrazu. Další nevýhodou bylo možné stranové posunutí vysokorychlostní kamery (a tím roztřesení obrazu), které vzniklo při jejím nechtěném pohybu, způsobeného při nástupu a pohybu obsluhy na žebříku v omezených prostorách okolo konstrukce padostroje. V neposlední řadě, zde nebylo zařízení, fyzická překážka (zámek), které by neoprávněně osobě zamezovalo polohování klece a hrozilo tak nebezpečí úrazu.

3.1.3 Ochrana kabeláže

Původní soustava padostroje neměla ochranné vodící prvky pro kabeláž nacházející se v pohyblivé části stroje. Hrozilo zde velmi pravděpodobné riziko poničení nebo úplné přetržení kabeláže. Z tohoto důvodu museli být kabely před každým testem ustaveny a zkontrolovány jejich pozice. Což zpomalovalo průběh přípravy experimentu.

3.1.4 Synchronizace signálů

Pro potřeby synchronizace signálů bylo použito indukčního snímače viz. obr. 3. Snímač se ukázal jako velmi nespolehlivý a bylo nutné nalézt optimálnější řešení. Pro správné fungování indukčního snímače bylo nutné nastavit profil z feromagnetického materiálu do vhodné vzdálenosti, aby ho snímač detekoval. Experimentálně ověřená vzdálenost byla okolo 3 mm i přesto, že výrobce uvádí 5-8 mm [14]. To způsobovalo několik problémů. Při odjištění mechanické spouště (viz. oddíl 3.1.2) mohlo dojít k rozkmitání klece a hrozila tak kolize snímače s profilem. V opačném případě mohla nastat situace, kdy profil nemusel být detekován. Bylo také obtížné určit jeho přesnou pracovní oblast.

3.1.5 Prostředí Labview

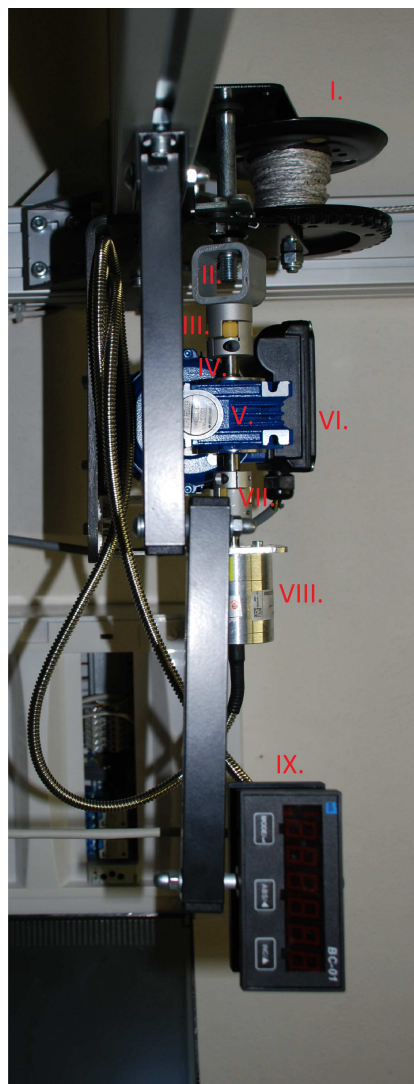
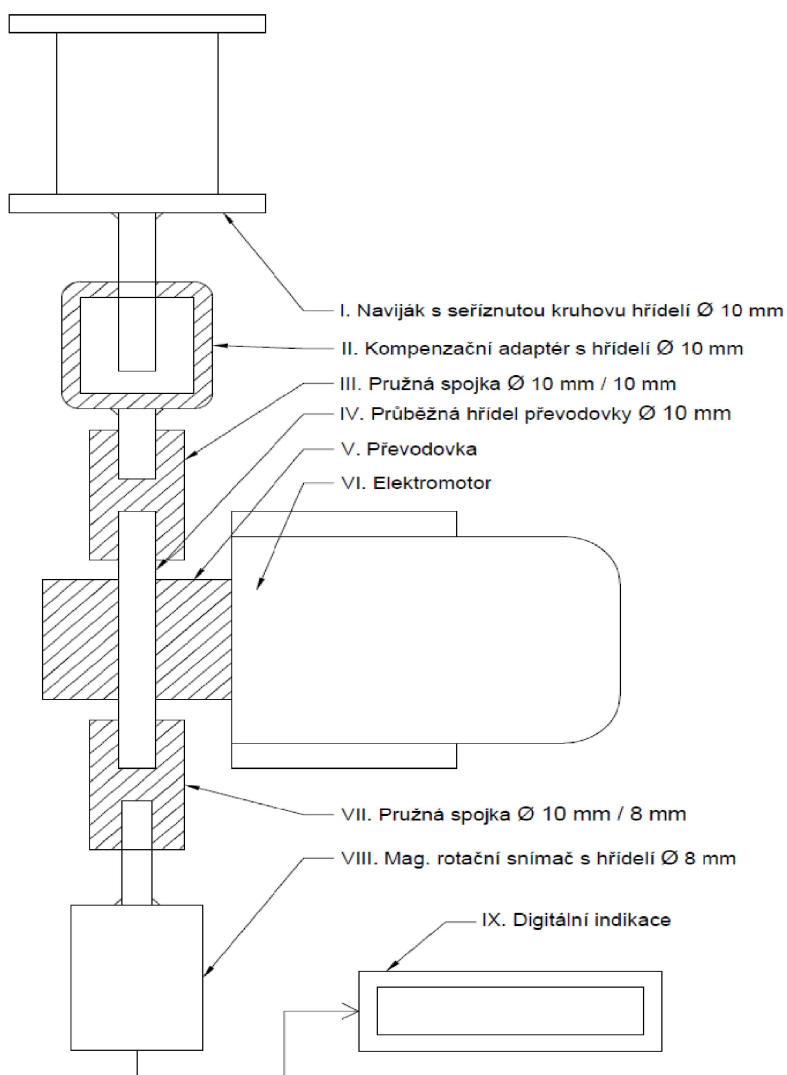
Původní zpracování výstupů bylo řešeno v prostředí Labview s jednoduchým uživatelským prostředím. Pro zpracování signálu byly použity tzv. expresní prvky, které urychlují vývoj, ale nejsou z pohledu úprav a synchronizace pro více zařízení vhodné. Mají omezené možnosti konfigurace, což není na závadu, pokud se používají pouze pro jedno vyčítací zařízení. Jedno vyčítací zařízení má omezené množství portů a tudíž k němu lze připojit pouze omezené množství senzorů.

3.2 Úprava padostroje

Po zkušenostech z původní verze padostroje byly hledány nejhodnější a cenově přijatelná řešení pro jeho vylepšení. Úprava padostroje se zabývala, jak stránkou mechanických úprav, tak i úprav softwarových částí. Větší důraz byl kladen na hardwarovou část, především z důvodu zajištění větší bezpečnosti. Nezabezpečené mechanické části mohou způsobit zranění obsluhy či poškození nákladných měřících zařízení. Další hardwarové úpravy se týkaly především přidání nových senzorů pro přesnější určení materiálových charakteristik. Úprava softwarové části byla provedena v závislosti na nově přidaných senzorech.

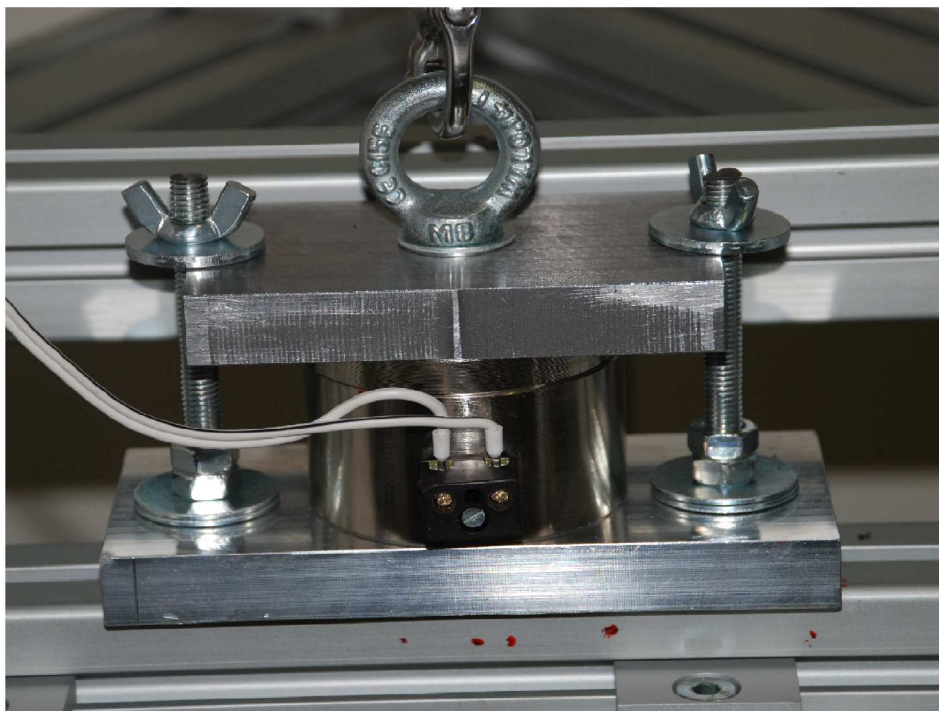
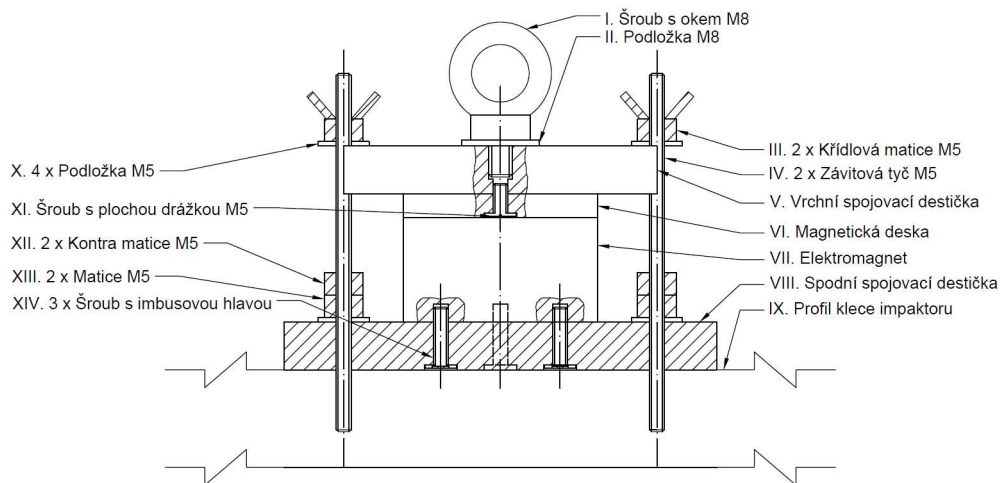
3.2.1 Úprava mechanických částí padostroje

Motorizace a odměřování: Padostroj byl osazen elektromagnetickým jednofázovým elektromotorem (MY 562-2 B14, Elektromotory - převodovky s.r.o, Česká republika) (obr. 4 - VI.) s jedním kondenzátorem, výkonem 0,12 kW a maximální hodnotou otáček za minutu 2760 ot min⁻¹. Motor je napájen ze sítě 230 V AC. Hřídel motoru byla přes šnekovou převodovku (MR25 I40, Elektromotory - převodovky s.r.o, Česká republika) (obr. 4 - V.) napojena na hřídel navijáku (obr. 4 - I.) pomocí pružné spojky (obr. 4 - III.) a adaptéru, kompenzující nesouosost spojení (obr. 4 - II.). Naviják obsahoval hřídel s seříznutým kruhovým průměrem pro původní manuální mechanismus. Aby se při otáčení minimalizovaly nežádoucí vibrace (vznikající nesouosostí spojení), byl vytvořen adaptér (výkres viz. příloha 1). Do vytvořeného otvoru se vložila seříznutá hřídel, která se při otáčení mohla volně pohybovat ve směru kolmém k seříznutí. Pohyb hřídele v drážce adaptéru kompenzoval nežádoucí nesouosost spojení. Druhá strana adaptéru obsahovala hřídel, která byla spojena s hřídelí převodovky (obr. 4 - IV.) pružnou spojkou (LK20-C30, COUP-LINK, Čína) (obr. 4 - III.) o vstupním i výstupním průměru 10 mm. Pro svislý převod krouticího momentu byla použita šneková převodovka (obr. 4 - V.) s převodovým



Obrázek 4: vlevo: schéma motorizace a odměřování, vpravo: fotografie sestavy motorizace a odměřování (fotografie pootočena o 90°)

poměrem 40. Odměřování polohy impaktoru bylo provedeno pomocí magnetického rotačního snímače (TRME-4096, Jirka a spol.sro, Česká Republika) (obr. 4 - VIII.) s 4096 pulzy za jednu otáčku. Tento snímač byl napojen na průběžnou hřídel převodovky (obr. 4 - IV.) z opačné strany než naviják pomocí pružné spojky (LK20-C30, COUP-LINK, Čína) (obr. 4 - VII.) o vstupním průměru 10 mm a výstupním průměru 8 mm. Pro odečítání polohy je ke snímači připojena digitální indikace (BC-01-HS, Jirka a spol.sro, Česká Republika) (obr. 4 - IX.) s rozsahem odměřování +/- 1000 m a rychlostí 30 m min⁻¹. Digitální indikace je napájena standardním napětím 24 V DC. Schéma a fotografie celé soustavy jsou zobrazeny na obr. 4.



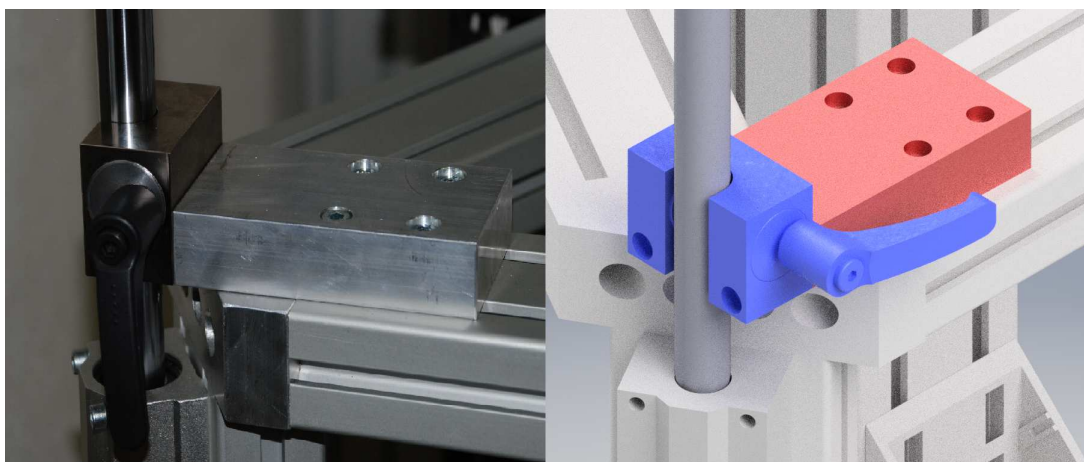
Obrázek 5: nahoře: schéma uchycení elektromagnetu a jistění křídlovými matkami, dole: fotografie sestavy uchycení elektromagnetu a jistění křídlovými matkami

Elektromagnetické odhazování: Manuální vypouštěcí mechanismus byl nahrazen spínacím elektromagnetickým odhazováním. Pro tento účel byl vybrán válcový elektromagnet (M52176 / 24VDC, Eclipse Magnetics Ltd., Velká Británie) (obr. 5 - VII.) o průměru 65 mm a přídržné síle zdvihu 1 kN. Potřebná síla zdvihu byla určena tak, aby parametr bezpečnosti vypouštěcího mechanismu měl dostatečně vysokou hodnotu cca 3 (označuje poměr skutečné přídržné síly k síle potřebné pro zdvih klece s impaktorem). Pro magnetickou spoušť byl navržen a vyroben

systém usazení a jištění dle schématu a fotografie na obr. 5. Hlavními prvky sestavy elektromagnetické spouště jsou dvě spojovací desky, svrchní ocelová (obr. 5 - V.) (výkres viz. příloha 2) a spodní z hliníkové slitiny (obr. 5 - VIII.) (výkres viz. příloha 3). Pro zajištění bezpečného provozu (zabránění neplánovaného odhození klece) při náhlém výpadku proudu bylo nutné řešit i bezpečnostní mechanické spojení. Jako bezpečnostní prvky byly namontovány dvě křídlové matky (obr. 5 - III.) na závitové tyče M5 (obr. 5 - IV.) připevněné k profilu klece impaktoru dle obr. 5. Křídlové matky byly zvoleny pro možnost jejich odmontování bez použití nářadí. Tímto řešením bylo docíleno pevného mechanického spojení nezávisle na fungování elektromagnetu. Při přípravě experimentu, při kterém se může obsluha nacházet v prostoru pod klecí, jsou matice zašroubovány k horní desce a jistí tak případné selhání el. magnetu. Před konečným vytažením klece do požadované výšky pro experiment se matice s podložkami (obr. 5 - X.) odšroubují a mechanická vazba je odstraněna. V tento moment je klec držena pouze silou elektromagnetu a lze ji uvolnit po zmáčknutí spouště. Pro zajištění volného chodu při uvolnění klece jsou díry na vrchní desce seříznuté. Tímto řešením je eliminováno případné zapříčení závitových tyčí v průchozích dírách při uvolnění klece.

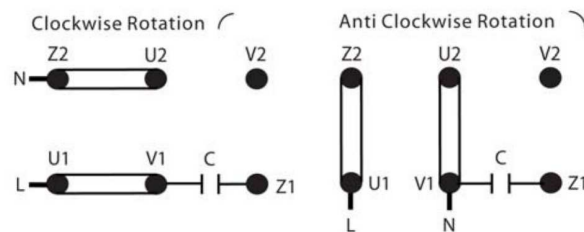
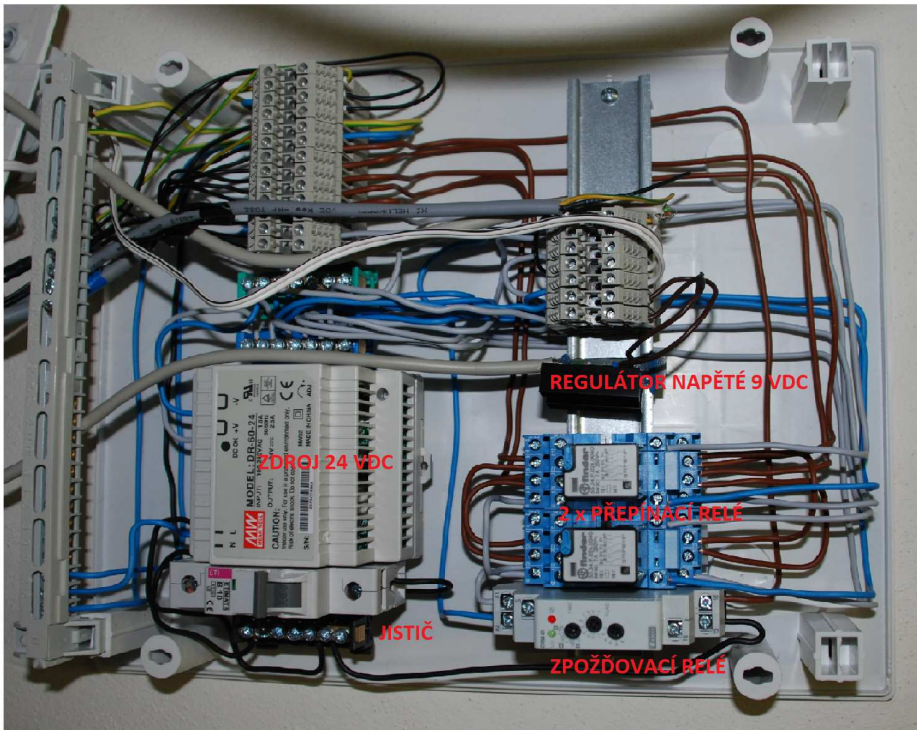
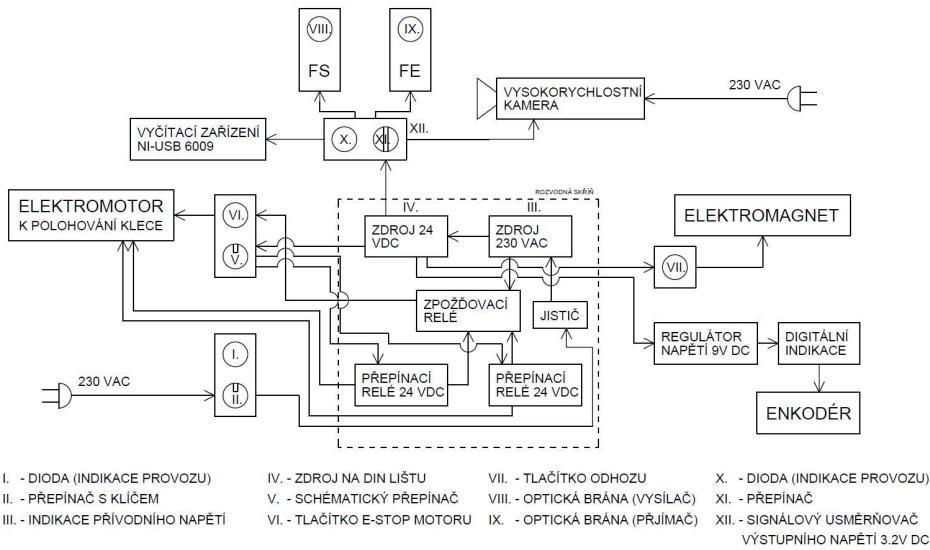
Manuální brzdy klece byly přidány do sestavy padostroje za účelem zvýšení celkové bezpečnosti posuvné klece, zabraňující jejího samovolného pádu. Jejich výhodou je, že brání dvěma typům selhání. Prvním je selhání el. magnetického odhazování, slouží tak jako pojistný mechanismus k již zmíněnému bezpečnostnímu zařízení jištění křídlovými matkami (viz. oddíl 3.2.1). Druhým je selhání lanka sloužícího pro zdvih klece a jeho uchycení, jak ke kleci, tak k vrchní části konstrukce padostroje. Toto lanko nebylo dosud nijak jištěno a v případě jeho selhání mohlo dojít k vážnému poranění obsluhy pokud by se nacházela v prostoru klece. Pro jištění klece byly pořízeny tři (na každou vodící tyč jedna) manuální brzdy (HKR1600A, ZIMMER group, Německo), každá o přídržné síle 1,2 kN. Když jsou všechny tři brzdy plně zaaretovány je jejich přídržná síla 3,6 kN, což dává koeficient bezpečnosti přes 10. Pro bezpečné jištění je tedy dostatečná i jedna brzda, protože má brzdou sílu o 0,2 kN vyšší než elektromagnet (viz. oddíl 3.2.1). Princip těchto brzd spočívá v sevření čelistí okolo vodící tyče a zamezení tak pohybu klece vůči tyči. Nutným použitím brzd v padostroji je v rámci zajištění bezpečnosti, kdy musí být brzdy použity vždy, když se provádí úkony, kdy se pod klecí nachází obsluha (vkládání, pozicování atd. vzorku). V opačném případě by hrozilo nebezpečí úrazu obsluhy. K uchycení brzd byl navržen a ke každé z brzd vyroben adaptační díl z hliníkové slitiny tak, aby bylo možné brzdy namontovat na pohyblivou klec v požadované pozici. Jako adaptační díly byly navrženy a

vyrobeny tři identické desky z hliníkové slitiny (výkres viz. příloha 4). Celková sestava napojení brzd je zobrazena na obr. 6.



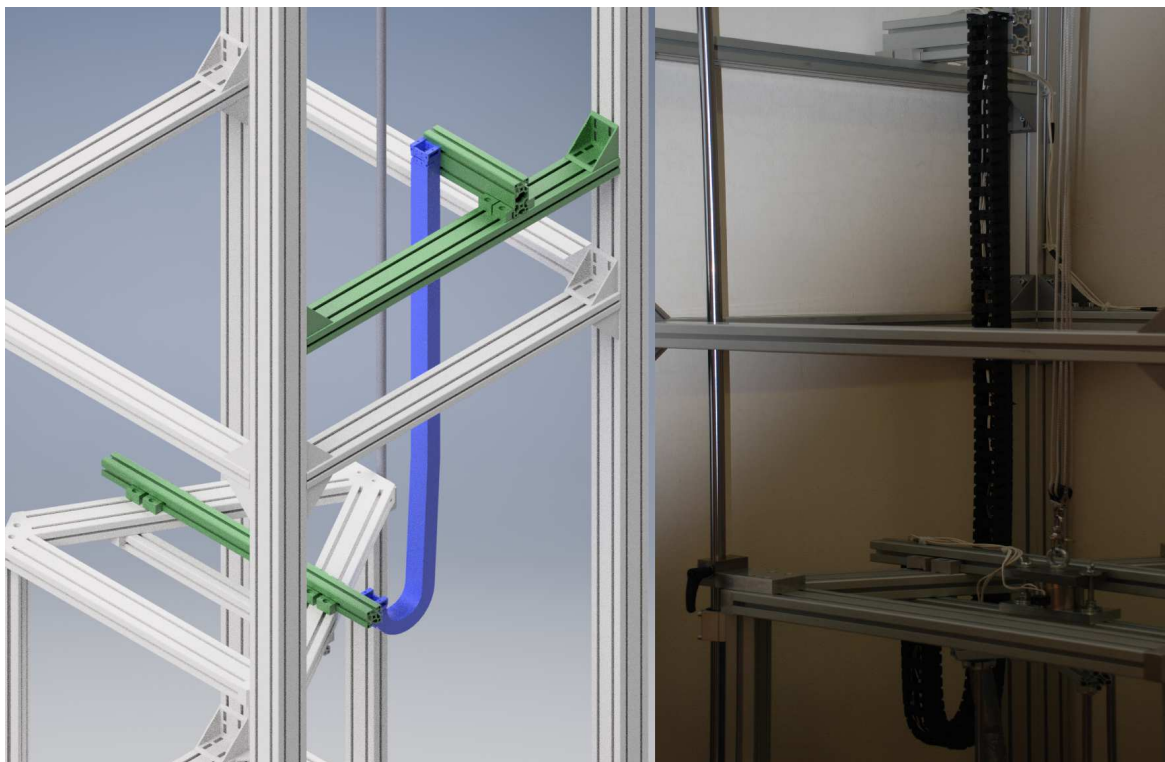
Obrázek 6: vlevo: fotografie sestavy uchycení brzdy ke kleci, vpravo: vizualizace uchycení brzd ke kleci (červená: spoj. destička, modrá: brzda)

Elektrická rozvodná skříň byla přidána za účelem jednotného napájení prvků padostroje. Rozvodná skříň také zjednodušuje připojení nových prvků do sítě dle potřeby právě probíhajících experimentů. Zdroj 230 V AC (obr. 7 - III.) je zapojen do sítě přes bezpečnostní klíčový uzávěr (obr. 7 - II.) a elektrický centrální jistič. Padostroj neměl bezpečnostní zámek pro případ manipulace se zvedacím mechanismem neoprávněnou osobou. Z tohoto důvodu byl namontován klíčový uzávěr, který neumožní náhodné zapnutí polohovacího zařízení klece. Elektrický jistič je zařízení, které při nadměrném průtoku el. proudu rozpojí elektrický obvod, zabraňuje tak možnému přetížení nebo zkratu. Elektromotor je napájen ze sítě 230 V AC. Pro jeho ovládání je použita přepínače (obr. 7 - V.), který je napojen na dvě přepínací relé. Otočením přepínače se určí směr rotace elektromotoru (dle typu zapojení pólu, viz. obr. 7 dole), pomocí sepnutí obvodu skrze dané přepínací relé (jedno relé je pro kladný směr otáčení druhé pro záporný). Protože elektromotor není schopný rychlého přepólování (změny směru otáčení) bylo za přepínače napojeno zpoždovací relé, které opozdí signál z přepínače o 1 s (čas dostatečný na přepólování el. magnetu). Posledním prvkem ovládání elektromotoru je tlačítko nouzového zastavení (E-Stop) (obr. 7 - VI.), které při sepnutí přerušuje obvod a zastaví tak veškerý pohyb elektromotoru. Ke zdroji střídavého napětí je připojen spínaný zdroj (obr. 7 - IV.), který je zdrojem stejnosměrného napětí 24 V DC. Stejnosměrným napětím jsou pak napájeny ostatní zařízení (např. optické brány (signálový přízpůsobovač) (obr. 7 - XII.), enkodér). Enkodér pro odměřování polohy



Obrázek 7: nahoře: schéma el. rozvodné skříně, uprostřed: fotografie el. rozvodné skříně, dole: schéma půlu elektromotoru

vyžaduje napětí 9 V, kterého je docíleno připojením lineárního usměrňovače na zdroj stejnosměrného napětí. Celkové provedení je zobrazeno na obr. 7.

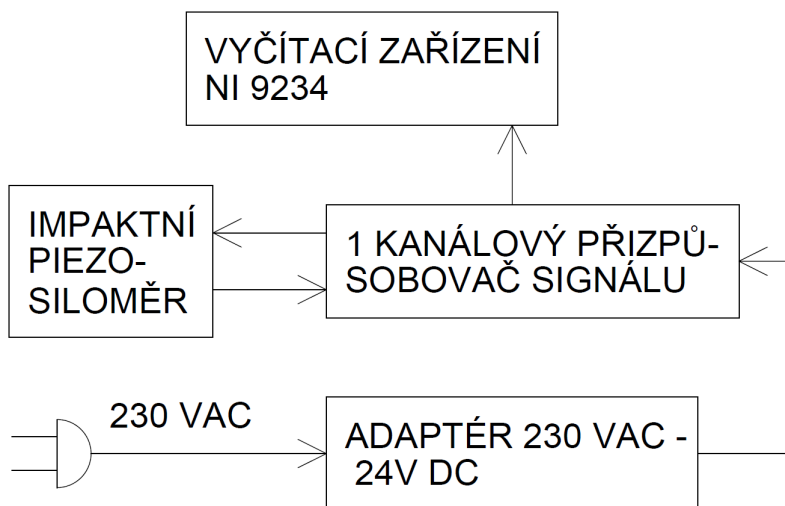


Obrázek 8: vlevo: vizualizace sestavy s energetickým řetězem (vyznačen modře), přídatné profily (zeleně), vpravo: fotografie řešení s energetickým řetězem

Nosič kabelu - energetický řetěz: Po zvážení všech možných alternativ (např. vedení pomocí spirálového kabelu) bylo použito k zabezpečení kabeláže pohyblivé části stroje energetického řetězu (E6-290-030-12, igus, Německo). Energetický řetěz je tvořen články z tvrdého plastu, které jsou spojeny čepy a tvoří tak pevnou ohebnou schránku pro kabeláž. Díky tuhosti spojů (bylo vybráno řešení s co nejnižší tuhostí) může docházet k nežádoucímu brzdění klece při odvalování jednotlivých článků. Je však předpokládáno, že brzdění je nepatrné a srovnatelné s ostatními vlivy, které jsou v případném výpočtu zanedbány. Toto řešení bylo vybráno hlavně kvůli velmi kvalitní ochraně, kterou poskytuje kabeláži měřících senzorů. Měřící senzory jsou zpravidla nákladně kalibrovány i s jejich kabeláží a je tedy žádoucí uchovat ji v nepoškozeném stavu. Kabel byl uchycen třemi hliníkovými nosíky (104080L-40x80x860, 104080L-40x80x250, 104040L-40x80x730, Alutec K&K, Česká republika), dvěma fixačními úhelníky (307476-74x76, Alutec K&K, Česká republika) a dvanácti pozičními spojkami (324047,

Alutec K&K, Česká republika) ke kleci a rámu padostroje dle obr. 8. Tyto profily a spojky jsou stejného typu jako ty, ze kterých je postaven rám a klec padostroje.

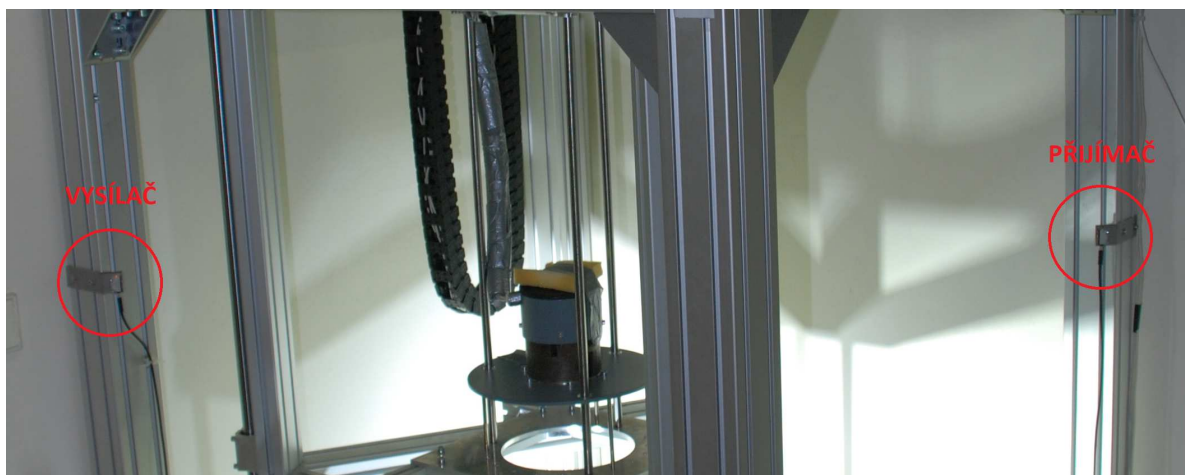
Vyčítací karty jsou zařízení, které se používají pro vyčtení dat z různých zařízení např. senzorů. V sestavě padostroje byly použity dvě vyčítací karty. Pro vyčítání signálu ze siloměru a akcelerometru bylo použito čtyřkanalového zařízení (NI 9234, National Instruments, USA) pro příjem analogového signálu s maximální vzorkovací rychlostí $51,2 \text{ kSs}^{-1}$ pro každý kanál. Pro vyčítání signálu z optických bran bylo použito zařízení (NI-USB 6009, National Instruments, USA) s maximální sdílenou (vyčítací rychlost se rozděluje mezi jednotlivé aktivní kanály) vzorkovací rychlostí 48 kSs^{-1} . Toto zařízení má osm analogových 14-bitových vstupů, dva statické analogové 12-bitové výstupy a dvanáct digitálních 32-bitových vstupů. Zařízení NI 9234 má rozsah vstupního napětí - 5 V až 5 V a zařízení NI-USB 6009 má rozsah vstupního napětí - 10 V až 10 V.



Obrázek 9: schématické znázornění zapojení siloměru

Impaktní siloměr byl do sestavy padostroje začleněn pro potřeby přímého měření síly. Impaktní piezosiloměr je složen z senzoru (200C20, ICP®, USA) a jedno-kanalového zařízení (482A21, ICP®, USA), které přizpůsobuje signál ze senzoru na signál vhodný pro vyčítací kartu a napájí senzor ze sítě 24 V DC pomocí adaptéru viz. schéma obr. 9. Za účelem zpracování dat signálu ze siloměru je k siloměru připojeno vyčítací zařízení NI 9234. Pro potřebu zabudování siloměru do spodního úderníku padostroje byla navržena sestava, která se skládá z násuvné základny, krytu siloměru, spodního úderníku, a dvou závitových tyčí.

Optické brány: Pro potřebu triggování byl padostroj osazen optickými bránami (FS/FE 10-RL-E4, Sensopart, Německo) používajících červené bodové světlo o vlnové délce 655 nm s aktivním dosahem 4 m. Dané brány fungují na principu dvou senzorů, vysílače (obr. 7 - VIII.) a přijímače (obr. 7 - IX.), když je světelný paprsek detekován přijímačem je napětí na výstupním svorkách 0 V. Pokud se nachází mezi vysílačem a přijímačem clona, která přeruší světelný paprsek, napětí na svorkách vzroste na napájecí hodnotu 10-30 V DC. Tyto optické brány podporují i opačný mód, při kterém se výstupní hodnoty napětí (při sepnutí a rozepnutí) prohodí. Tyto hodnoty jsou příliš vysoké pro vyčítací zařízení NI-USB 6009, a proto musí být signál usměrněn na nižší hodnotu. K tomuto účelu slouží usměrňovač signálu (původně navržený pro zařízení SHPB) (obr. 7 - XII.), který redukuje signál na 3,2 V. Zapojení optických bran je zobrazeno ve schématu rozvodné skříně obr. 7. Optické brány jsou namontovány na nosném rámu v dolní části (viz. obr. 10) tak, aby byly co nejnižze, a přitom nebyly cloněny pohyblivou klecí nacházející se v dolní poloze. Toto umístění optických bran je voleno z důvodu případného určování rychlosti impaktoru pomocí signálu z optických bran.

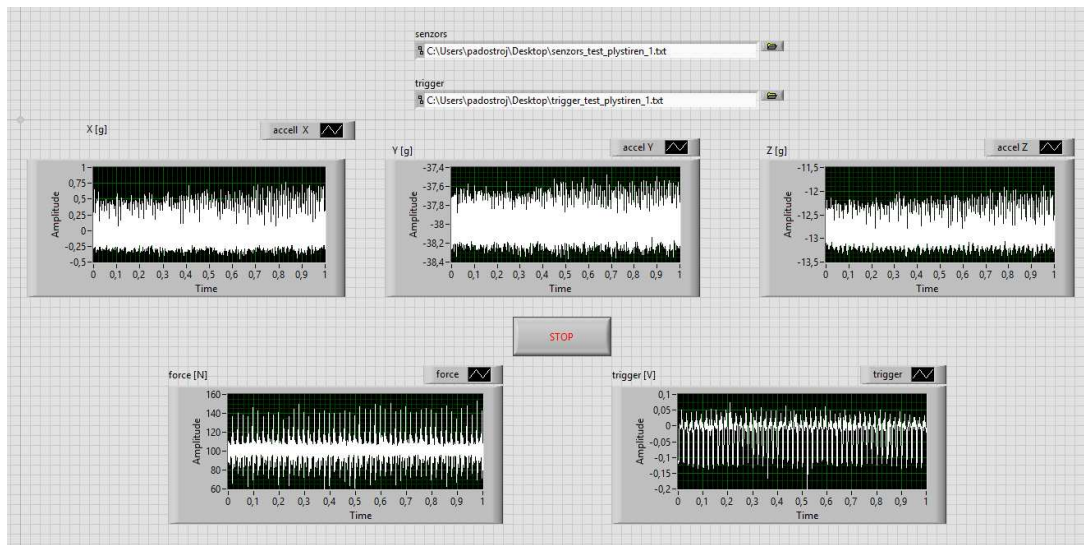


Obrázek 10: obrázek umístění optických bran

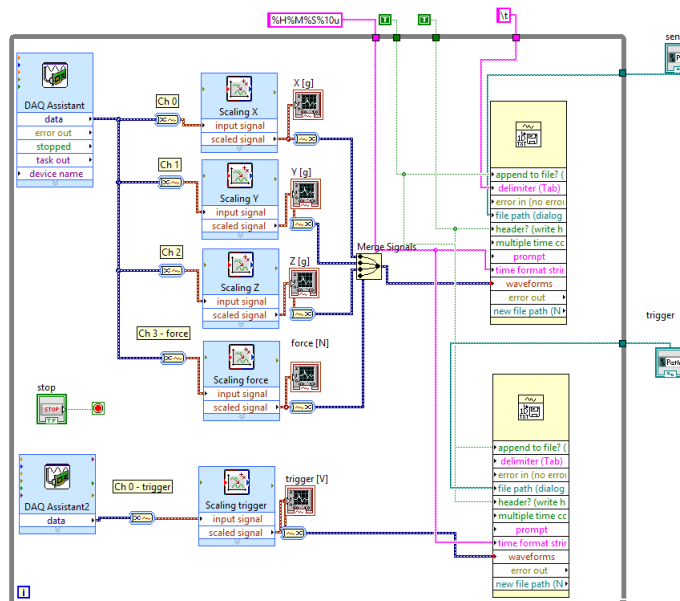
3.2.2 Úprava softwaru

Ovládací a měřicí software padostroje byl částečně modifikován, aby ho bylo možné použít pro upravený hardware padostroje. Do aplikace bylo implementováno ukládání výstupních dat z triggeru (výstup z optických bran), pomocí rozšíření počtu vstupních kanálů. Z těchto dat je možné určit pádovou rychlost impaktoru. Hlavním účelem triggeru je však spuštění rychloběžné kamery těsně před nárazem. Další modifikací byla výměna některých expresních prvků

zajišťující ukládání dat za standardní. Touto úpravou se docílilo ukládání dat ve vhodnějším formátu pro postprocessing. Přední uživatelský panel je zobrazen na obr. 11, ukázka blokového diagramu je zobrazena na obr. 12.



Obrázek 11: ukázka VI programu - uživatelský panel



Obrázek 12: ukázka VI programu - blokový diagram

4 Ověření funkčnosti upraveného padostroje pomocí pádové zkoušky a stanovení deformačního chování vzorku kovových pěn

4.1 Příprava vzorků pro experiment

Pro vyhodnocení funkčnosti upraveného padostroje na Ústavu mechaniky a materiálů byla provedena pádová zkouška na vzorcích kovových pěn. Pro testy byly vybrány dva typy hliníkových pěn se zavřenými póry. Z každé pěny byly připraveny a otestovány dva vzorky.

4.1.1 Vlastnosti kovových pěn

Kovová pěna Alporas byla poprvé vyrobena v roce 1986 v Japonsku. Skládá se z 96,9 % Al, 1,5 % Ca a 1,6 % TiH_2 . Alporas se vyrábí ve třech krocích, nejprve se nalije roztavený čistý hliník do formy, kde se zhušťuje, zvyšuje se jeho viskozita (aby se v něm udržely bubliny vzduchu). K tomu je třeba zhušťovač Ca, s nímž se hliník míchá za přítomnosti vzduchu při teplotě 680 °C po dobu šesti minut. Poté se směs nalije do licí formy, kde se vytvrdí za pomoci TiH_2 . Tento proces trvá 15 minut při teplotě 680 °C. Nakonec se hotová pěna ochladí a nařeže na tenké pláty k prodeji. Alporas se vyrábí ve dvou formách v závislosti na velikosti pórů. Konvenční Alporas má velikost póru od 1 mm do 13 mm s průměrnou velikostí 4,5 mm, tento typ má dobré zvuk pohlcující vlastnosti. Druhým typem je pěna s menší velikostí pórů od 1 mm do 7 mm s průměrnou velikostí 3 mm, tento typ dokáže pohlcovat lépe zvuk o vyšší frekvenci [16].

Kovová pěna Alcoras je složením podobná pění Alporas a vyrábí ji firma Alcarbon v Hamburku. Výrobní postup této pěny vychází z principu výroby pěny Alporas, jeho detaily nejsou firmou zveřejněny. Vyrábí se ve čtyřech formách v závislosti na velikosti pórů a chem. složení. První druh se skládá z 96 % Al, 3 % Ca, 2,8 % Zn, 0,2 % Si, 0,1 % Fe a má velikost pórů 3 - 4 mm. Zbývající tři druhy mají podobné složení 93,5 % Al, 4,2 % Ca, 1,5 % Mg, 0,5 % Fe, 0,2 % Si, liší se pouze ve velikosti pórů, která je od 3 mm do 10 mm. Tato pěna je vyráběna ve formě velkých desek (2400 x 800 mm nebo 1000 x 500 mm), které se používají jako izolační materiál v budovách. Různé druhy této pěny se odlišují v izolačních schopnostech (např. v pohlcování zvuku) a v rozdílné hmotnosti (hustotě) pěny [17].

Tabulka 2: Parametry vzorků kovových pěn

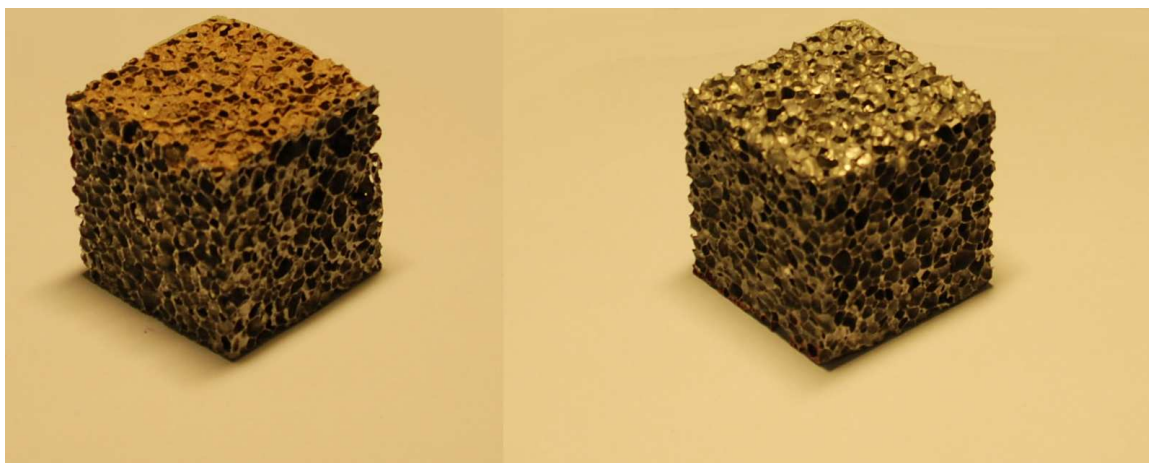
název kovové pěny	Alporas		Alcoras	
číslo vzorku	1	2	1	2
rozměr x [mm]	50,55	50,81	50,71	50,29
rozměr y [mm]	50,68	50,80	46,42	44,70
rozměr z [mm]	50,79	50,29	48,24	51,30
hmotnost vzorku [g]	29,746	30,446	25,782	26,723
objem vzorku [mm ³]	130 118	129 806	113 555	115 321
porozita vzorku [–]	0,085	0,087	0,084	0,086

4.1.2 Vlastnosti vzorků

Pro rovnoměrné působení síly impaktoru na vzorek je potřeba, aby vzorky co nejvíce přiléhali spodní a horní stranou na úderník a impaktor. Druhou podmínkou je, aby tyto strany byly co nejvíce paralelní. Z tohoto důvodu byly polotovary pěn nařezány na kvádry s co nejshodnějšími rozměry. Poté byly všechny strany nahrubo zbrušeny brusným papírem o hrubosti 240 (hrubost je definována jako počet zrn na čtvereční palec). Horní a dolní strany byly poté znovu zbrušeny na jemno brusným papírem o hrubosti 400 tak, aby byla velikost rozměru od horní plochy k podstavě (rozměr je značený písmenem x) shodná s přesností na milimetry. Rozměr x slouží jako výchozí hodnota pro určení posunutí (deformace) vzorků. Vzorky byly zváženy na laboratorních vahách. Na základě hmotnosti a známého objemu byla spočtena jejich nominální porozita jako procentuální vyjádření poměru pevného materiálu vůči vzduchu. Porozita n_x vzorků se určí dle rovnice:

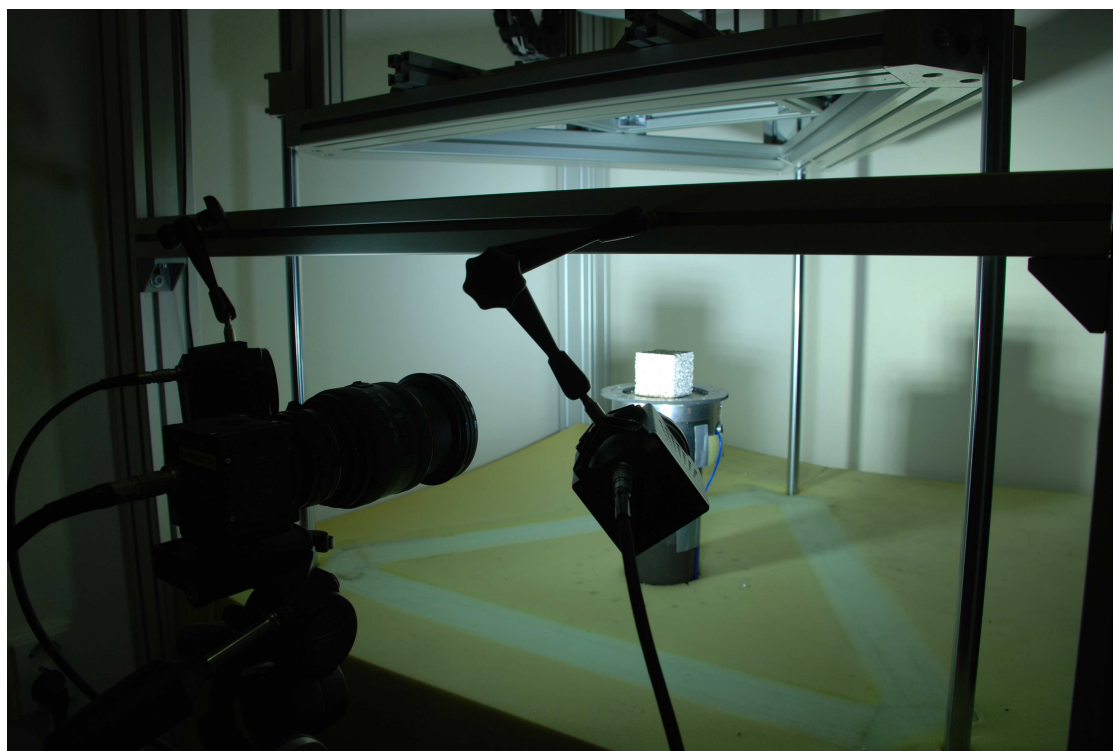
$$n_x = \frac{V_p}{V} = \frac{m}{V \cdot \rho_p} \quad (13)$$

kde V je objem vzorku, m je hmotnost vzorku, V_p je objem pevné složky a ρ_p je hustota pevné složky. Jako hustota pevné složky pěn byla pro výpočet použita hustota čistého hliníku tj. 2700 kg m³, která je velmi podobná jejich skutečné hustotě (zastoupení hliníku v obou pěnách dominuje nad ostatními prvky, které jsou pouze pozůstatky po výrobním procesu). Výsledné parametry vzorků jsou zobrazeny v tabulce č. 2. Posledním krokem je nastříkání pohledové strany (svislá strana snímaná rychloběžnou kamerou) vzorku kontrastní barvou s bílými zrnky. Na dané straně tak vznikne textura, která je vhodnější pro DIC algoritmus než původní struktura. Vzorky připravené z kovových pěn jsou na obr. 13.



Obrázek 13: vzorky kovových pěn: vlevo alcoras, vpravo alporas

4.2 Popis experimentu pro test kovových pěn



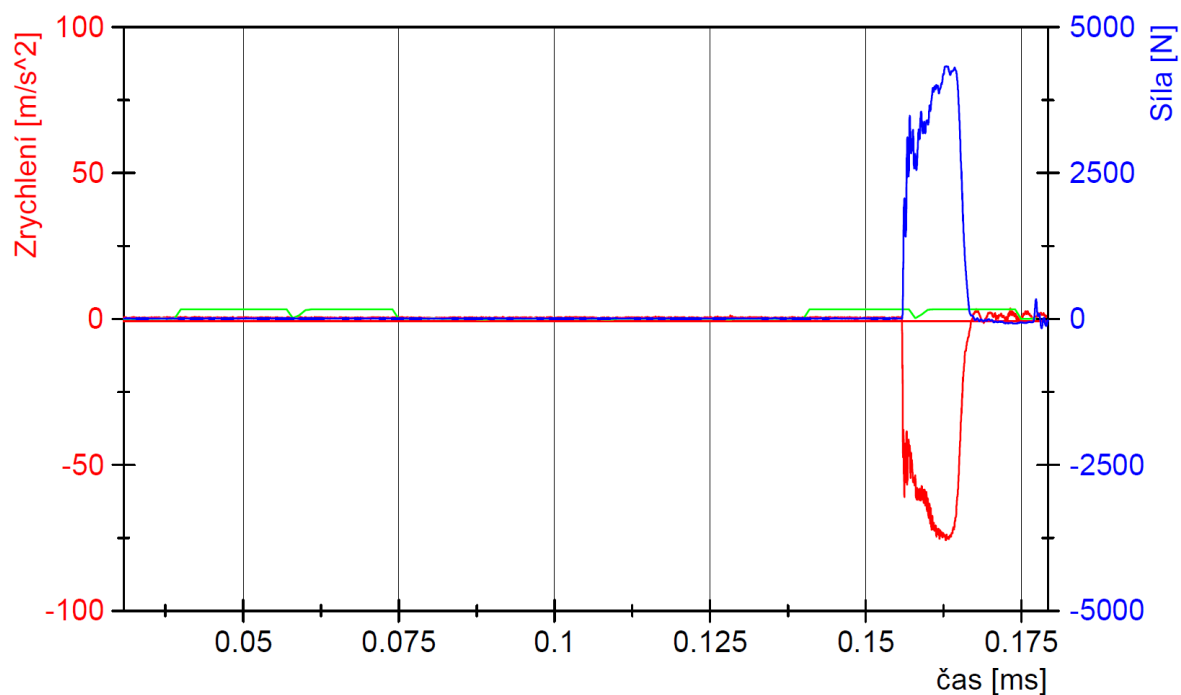
Obrázek 14: konfigurace padostroje pro test kovových pěn

Pro test bylo použito impaktoru s plochou úderníkovou deskou o souhrnné hmotnosti 6504 g, který padal z inicializační výšky 1687 mm (vzdálenost od hrany impaktoru k hraně spodního úderníku). Průběh deformace vzorků byl zaznamenáván vysokorychlostní kamerou (NX3, Integrated Design Tools, Inc., USA) s vzorkovací frekvencí 3.410 fps a rozlišením 896 x 792 pixelů

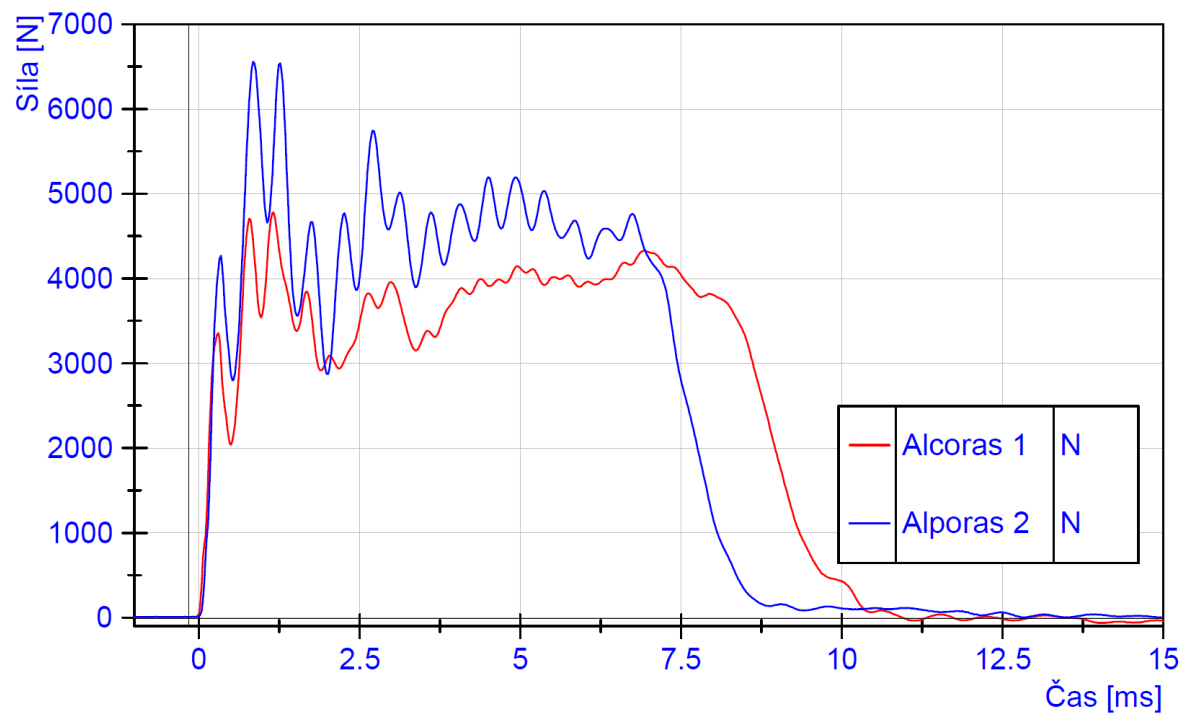
(snížením rozlišení může být vzorkovací frekvence zvýšena, maximální rozlišení kamery je 1280 x 1024 pixelů s vzorkovací frekvencí 2.500 fps). Vysokorychlostní kamera snímá s velmi krátkým expozičním časem, proto je potřeba výkonného osvětlení, aby byly vzorky na snímkách zřetelně viditelné (s rostoucí intenzitou osvětlení se zvyšuje množství detailů záznamu, až po dosažení optimální intenzity). Pro tento účel bylo použito dvou přídatných světelných zdrojů (Constellation 60, Veritas, USA), které zajistily homogenní osvětlení vzorků. Při testech byly zaznamenávány také zrychlení impaktoru a síla působící na vzorek, pomocí senzorů umístěných v padostroji. Pro spuštění záznamu z vysokorychlostní kamery byl použit trigger z důvodu omezené délky záznamu (tento typ kamery je při maximální vzorkovací frekvenci schopný nahrát záznam pouze o délce okolo cca. 2 s. Konfigurace padostroje pro experiment je zobrazena na obr. 14.

4.3 Naměřená data z pádové zkoušky kovových pěn

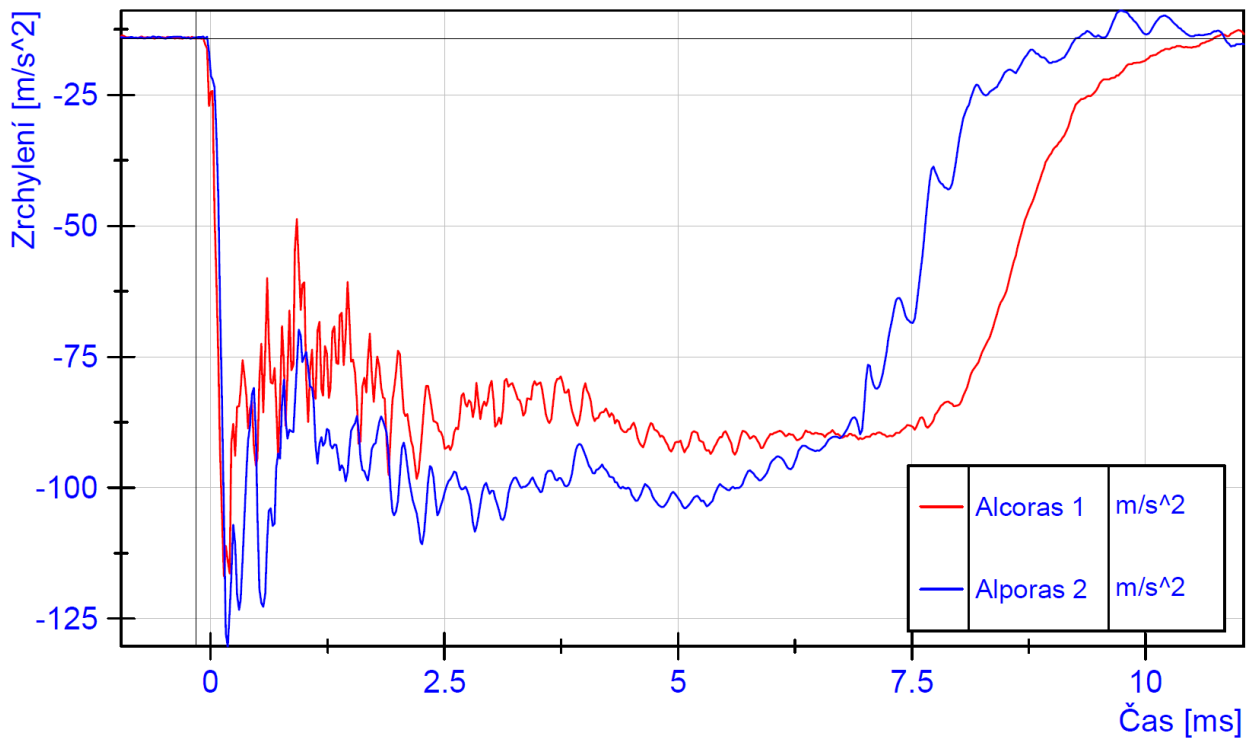
Data z experimentu všech čtyř vzorků byla ukládána pomocí navržené aplikace v prostředí Labview. Průběh naměřených signálů ze všech senzorů (optické brány, siloměr, akcelerometr) pro vzorek Alporas 1 je znázorněn na obr. 15. Červeně je zobrazen výstup z akcelerometru (zrychlení), modře výstup ze siloměru (síla) a světlezeleně výstup z optických bran (trigger). Z grafu je patrné, že data ze senzoru jsou synchronizována, (nárůst síly je ve stejném okamžiku jako nárůst zrychlení). Trigger je poprvé aktivovaný přibližně 0,15 ms před nárazem. V grafu je patrné, že aktivace triggeru proběhla víckrát. Každá aktivace odpovídá průchodu jednoho nosníku klece s impaktorem. Na obr. 16 je zobrazen průběh z impaktního siloměru pro vzorky Alporas 2 a Alcoras 1. Začátek deformačního děje je pro porovnání posunut do nulové časové hodnoty. Stejným způsobem jsou upravena data z akcelerometru, která jsou zobrazena na obr. 17. Deformace byla úspěšně zaznamenána také vizuálně rychloběžnou kamerou, vybrané snímky zachycující průběh deformačního děje jsou zobrazeny na obr. 18.



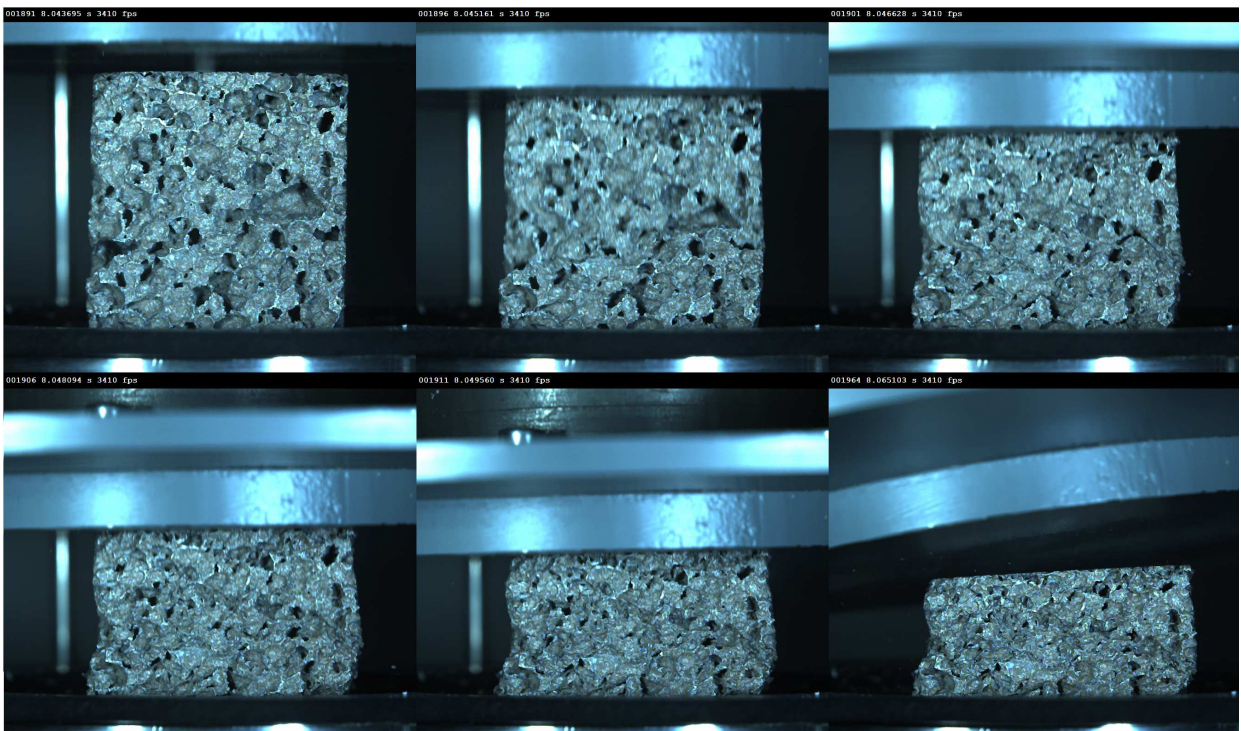
Obrázek 15: průběh naměřených signálů ze všech senzorů (akcelerometr - červeně, siloměr - modře, trigger - zeleně) pro vzorek Alporas 1



Obrázek 16: průběh síly vybraných vzorků (Alcoras 1 - červeně, Alporas 2 - modře)



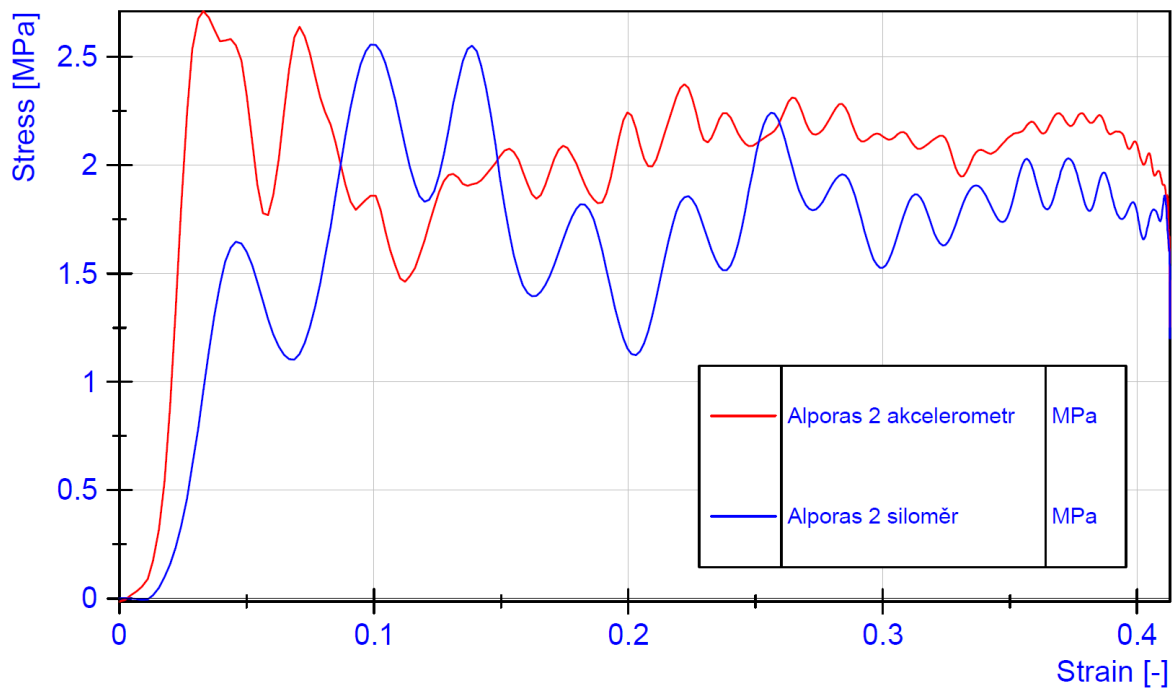
Obrázek 17: průběh zrychlení vybraných vzorků (Alcoras 1 - červeně, Alporas 2 - modře)



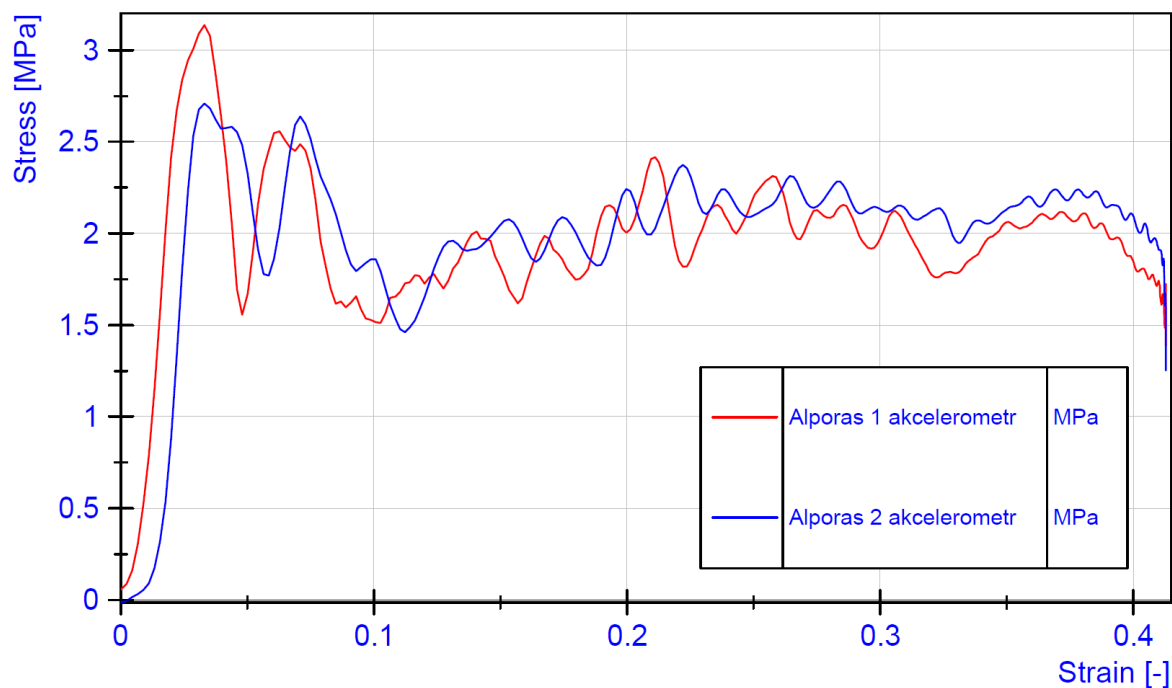
Obrázek 18: sekvence snímků z rychloběžné kamery

4.4 Výsledky experimentu

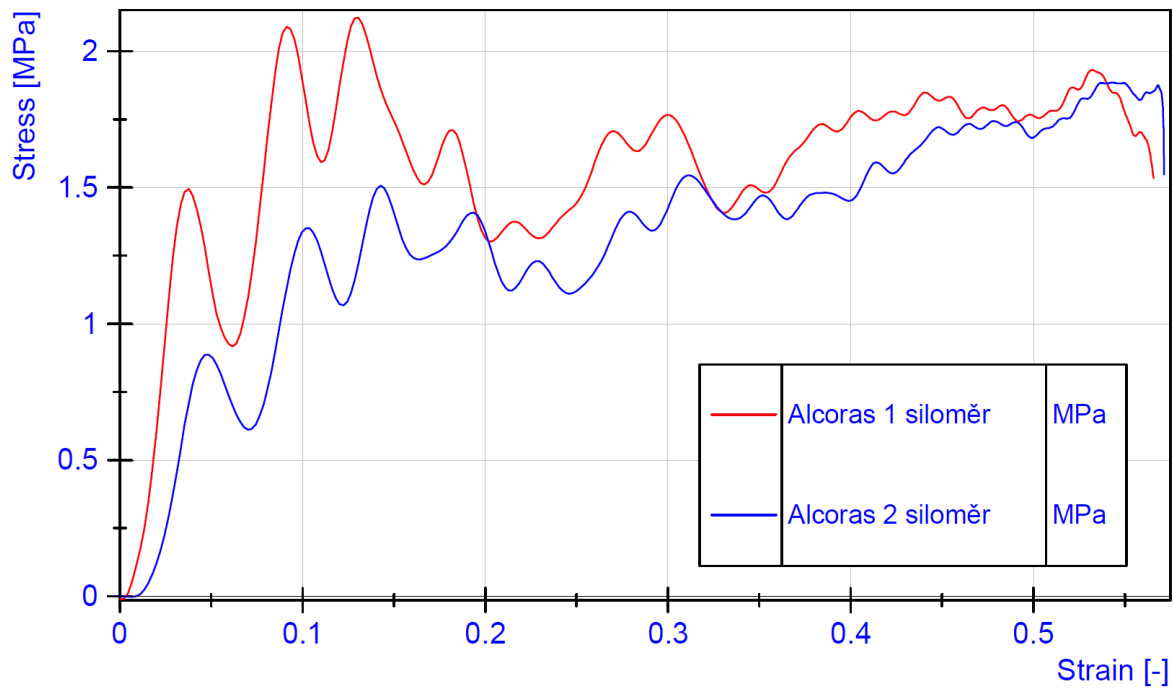
Výsledky experimentů byly vyhodnoceny do podoby diagramu napětí - deformace (inženýrská) (viz. oddíl 2.3.3). Pro vyhlazení signálu (odstranění nežádoucích frekvencí způsobených např. vibracemi při deformaci nebo šumem senzorů) byl použit Savitzky-Golay (SG) filtr. Na obr. 19 je zobrazeno srovnání průběhů napětí (odvozené na základě dat z akcelerometru, odvozené na základě dat ze siloměru) a deformace (inženýrské odvozené na základě dat z akcelerometru) na vzorku Alporas 2. Křivka akcelerometru na začátku deformačního děje předchází křivku siloměru, v oblasti plastické deformace už mají obě křivky podobný trend. Posun křivek může být způsoben rozdílným umístěním senzorů, kdy je siloměr umístěn až pod vzorkem zatímco akcelerometr je nad vzorkem. Časový rozdíl je pak pravděpodobně způsoben zpožděním deformační vlny při průchodu vzorkem. Na obr. 20 je zobrazen diagram napětí - deformace (inženýrská) odvozené na základě dat z akcelerometru obou vzorků kovové pěny Alporas. Jelikož se jednalo o vzorky podobných rozměrů a z totožného typu materiálu, jsou i křivky obou vzorků podobné. Odchylna v průbězích je z největší pravděpodobností způsobena odlišnostmi ve struktuře jednotlivých vzorků, které jsou dány výrobní technologií. Deformační chování vzorků je pak vždy trochu odlišné. Graf na obr. 21 zobrazuje diagram napětí (ze siloměru) - deformace (inženýrská z akcelerometru) obou vzorků kovové pěny Alcoras. Je zde vidět o něco větší odchylna obou křivek, což může být způsobeno menší kvalitou kovové pěny Alcoras (kovová pěna Alcoras je méně homogenní než kovová pěna Alporas). Na obr. 22 je zobrazeno srovnání napětí získaného z dat akcelerometru (pro obě křivky) a deformace získané pomocí metody DIC (viz. oddíl 2.4.3) a pomocí dat získaných z akcelerometru. Z grafu lze usuzovat, že pro určení napětí pomocí metody DIC nebylo získáno dostatečné množství snímků z rychloběžné kamery v oblasti pružné deformace. Výsledky z oblasti plastické deformace jsou již použitelné, což je způsobeno pomalejším průběhem deformace. Pro získání většího počtu dat metodou DIC by bylo potřeba rychloběžné kamery s vyšší vzorkovací frekvencí.



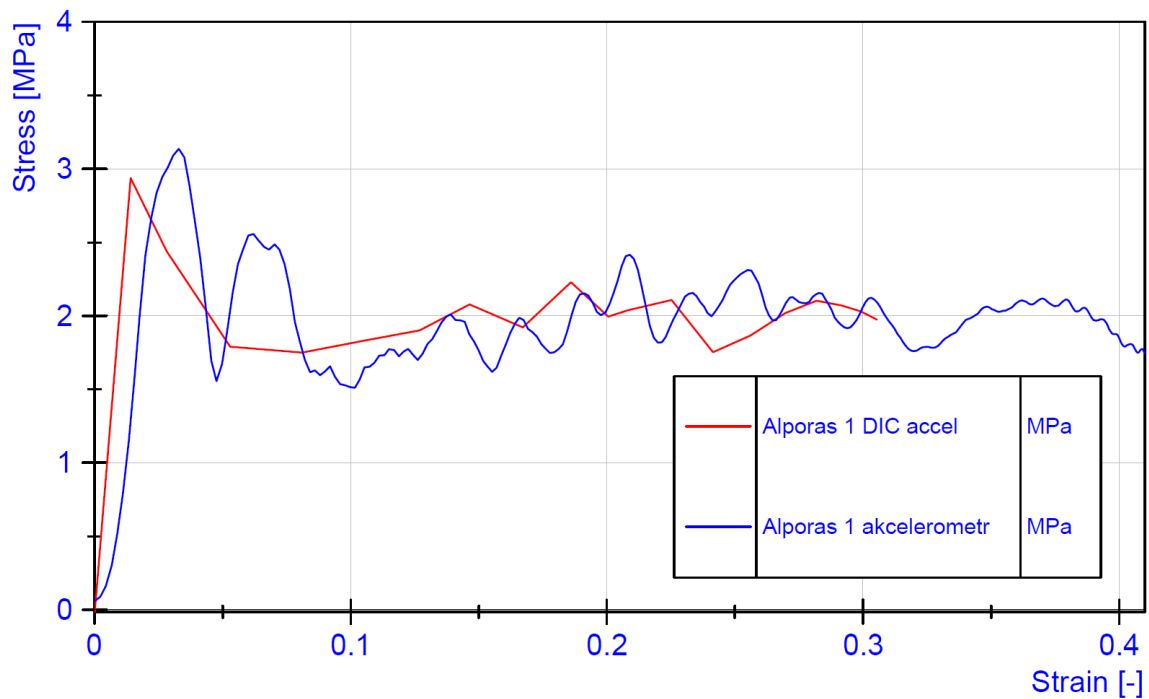
Obrázek 19: porovnání průběhů napětí odvozených z dat (akcelerometru - červeně, siloměru - modře) a deformace odvozené z dat akcelerometru vzorku Alporas 2, vyhlazené SG filtrem



Obrázek 20: porovnání průběhu napětí a deformace odvozených z dat akcelerometru vzorků (Alporas 1 - červeně, Alporas 2 - modře), vyhlazené SG filtrem



Obrázek 21: porovnání průběhu napětí odvozeného z dat siloměru a deformace odvozené z dat akcelerometru vzorků (Alcoras 1 - červeně, Alcoras 2 - modře), vyhlazené SG filtrem



Obrázek 22: porovnání průběhů napětí odvozených z dat akcelerometru a deformace odvozené (metodou DIC - červeně, z dat akcelerometru - modře) vzorku Alporas 1, vyhlazené SG filtrem

5 Závěr

Hlavním cílem předkládané bakalářské práce byla úprava původní pádové věže na Ústavu mechaniky a materiálů pro bezpečnější, spolehlivější, přesnější a komfortnější zajištění deformační odezvy testovaných prvků. V teoretickém úvodu byl popsán princip fungování padostroje a s ním související teorie rázové zkoušky, nutné pro pozdější vyhodnocení ověřovacího experimentu. V další části teorie byly analyzovány veličiny, které lze instrumentovaným padostrojem přímo měřit a způsoby jejich měření. Z těchto veličin byly poté odvozeny veličiny popisující vlastnosti testovaných vzorků (materiálů). V poslední části teorie byly popsány senzory a metody, které jsou v padostroji využity k získání výše zmíněných veličin.

Ve stěžejní části práce byly zkoumány a popsány nedostatky původní koncepce padostroje, který byl původně navržen pouze pro testování ochranných přileb. Poté byly navrženy a zrealizovány nejvhodnější cenově přijatelná řešení výše zmíněných nedostatků. Vylepšení se týkala jak mechanické části tak i softwarového vybavení. Nejdůležitější mechanické vylepšení byly v oblasti bezpečnosti, především ve vícestupňové ochraně pohyblivých částí před možnými úrazy obsluhy nebo ochrany kabeláže či ochrany nákladných měřících zařízení. Další úpravy mechanické části se týkali přidáním nových senzorů pro rozšíření měřených veličin vedoucí k většímu spektru možných materiálových charakteristik a senzoru pro přesnější polohování či triggování. Tyto senzory vyžadovaly nová sběrná zařízení a úpravu stávajícího softwaru pro vyčítání jejich výstupních dat. Úprava mechanické části obsahovala také motorizaci zvedacího mechanismu a výměnu manuálního odhazování za elektromagnetické. To vedlo ke zvýšení celkového komfortu zařízení. S nárůstem elektrických zařízení vznikla potřeba jednotného systému elektrických rozvodů, za tímto účelem byla k padostroji přidána elektrická rozvodná skříň.

V závěrečné části práce byl proveden experiment pomocí pádové zkoušky, který ověřil funkčnost upraveného padostroje a stanovil deformační chování testovaných vzorků. Pro experiment byly připraveny a popsány vzorky z dvou druhů kovových pěn. Po provedení pádové zkoušky byla naměřená data z experimentu zpracována a vyhodnocena. Získané výsledky z experimentu ověřily funkčnost padostroje. Z výsledků je patrné, že padostroj lze použít jako zařízení pro provádění dynamických deformačních zkoušek.

6 Zdroje a použitá literatura

Reference

- [1] P. Zlámal, T. Fíla, V. Králík: *Testing of energy absorption capability of sandwich structures based on metal foams for design of protective helmets*, Faculty of Transportation Sciences, CTU in Prague, Institute of Theoretical and Applied Mechanics AS CR, Faculty of Civil Engineering, CTU in Prague (2015)
- [2] M. Strano: *A new FEM approach for simulation of metal foam filled tubes*, Journal of Manufacturing Science and Engineering (2011)
- [3] M. Šudrich: *Experimentální studie chování cyklistické přilby při pádové zkoušce*, České vysoké učení technické v Praze (2013)
- [4] J. Kunecký: *Numerical and experimental analysis of protective sport helmets*, České vysoké učení technické v Praze (2011)
- [5] PC control learning zone - *Accelerometers*, www.pc-control.co.uk/accelerometers.htm (2008)
- [6] PCB piezotronics.sro - *Introduction to MEMS accelerometers*, www.pcb.com/Resources/Technical-information/mems-accelerometers (2017)
- [7] *Journal of the society of motion picture engineers: High-speed photography* (1949)
- [8] H. Lu, P. Cary: *Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient*, Experimental Mechanics (2000)
- [9] Ncorr v1.2 - *DIC Algorithms*, www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms (2013)
- [10] G. Gauschi: *Piezoelectric sensorics*, Springer Berlin (2002)
- [11] *Guide to the Measurement of Force*, The Institute of Measurement and Control in London (2013)
- [12] automatizace.hw.cz - *Bezkontaktní indukční snímače přiblížení - obecný popis*, automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/indukcni-snimace-priblizeni-obecny-popis.html (2004)
- [13] Pepperl+Fuchs - *Sensors and Systems Edition 3.0*, www.pepperl-fuchs.com (2014)

- [14] CNCshop.cz - *IPS-18 indukční snímač M18x1, kabel 1,5m* www.cncshop.cz/ips-18-indukcni-snimac-m18x1-kabel-1-5m (2010)
- [15] ČSN 33 2130 ED.2: *Elektrické instalace nízkého napětí - Vnitřní elektrické rozvody* (2009)
- [16] T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama, A. Kitahara: *Aluminum foam, "Alporas": The production process, properties and applications*, Shinko Wire Company Ltd., Izumisano, Kyushu National Industrial Research Institute, Tosu, Japan (1999)
- [17] AlCarbon - *Alcoras*, www.alcarbon.de/produkte/metallschaum-platten/alcoras/technische-daten (2017)

7 Seznamy použitých prvků

Seznam obrázků

1	schéma piezorezistivního akcelerometru	16
2	schéma impaktní piezo siloměr	19
3	obrázek původní klece a vizualizace původního padostroje	23
4	schéma a obrázek motorizace a odměřování	26
5	schéma a obrázek uchycení elektromagnetu a jištění křídlovými matkami	27
6	schéma a obrázek uchycení brzdy ke kleci	29
7	schéma a obrázek el. rozvodné skříně a schéma pólů elektromotoru	30
8	schéma a obrázek řešení s energetickým řetězem	31
9	schématické znázornění zapojení siloměru	32
10	obrázek umístění optických bran	33
11	ukázka VI programu - uživatelský panel	34
12	ukázka VI programu - blokový diagram	34
13	obrázek vzorků kovových pěn	37
14	konfigurace padostroje pro test kovových pěn	37
15	graf průběhu naměřených signálů ze všech senzorů	39
16	graf průběhu síly vybraných vzorků	39
17	graf průběhu zrychlení vybraných vzorků	40
18	sekvence snímků z rychloběžné kamery	40
19	diagram napětí - deformace porovnání průběhů napětí z akcelerace a siloměru	42
20	diagram napětí - deformace porovnání průběhu napětí pěny Alporas	42
21	diagram napětí - deformace porovnání průběhu napětí pěny Alcoras	43
22	diagram napětí - deformace porovnání průběhů napětí z akcelerace a DIC	43

Seznam tabulek

1	veličiny, které jsou přímo měřitelné v sestavě instrumentovaného padostroje . . .	14
2	parametry vzorků kovových pěn	36

Seznam příloh

- 1 Kompenzační adaptér
- 2 Vrchní spojovací destička el. magnetického odhazování
- 3 Spodní spojovací destička el. magnetického odhazování
- 4 Desky pro uchycení brzd klece