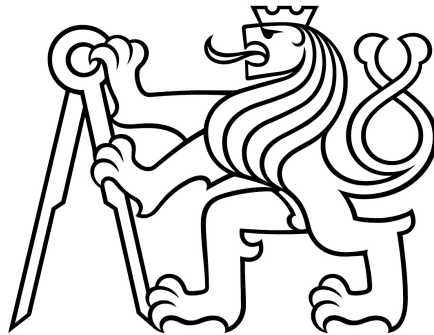


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ



VYHODNOCENÍ DEFORMACE POMOCÍ OPTICKÉHO SYSTÉMU S VÍCE
ZDROJI

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MICHAEL HUDÁK

PRAHA, 2021



K618 **Ústav mechaniky a materiálů**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Michael Hudák

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Vyhodnocení deformace pomocí optického systému s více zdroji**

Název tématu (anglicky): Strain Measurement using Multi-camera Digital Image System

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Přesné stanovení deformace z obrazových dat je klíčové pro stanovení deformačního chování vzorků se složitou vnitřní strukturou. Sledování povrchu vzorku z více zdrojů je nezbytné z hlediska zachycení deformačního děje v místech, která jsou od sebe významně vzdálena či se např. nacházejí v jiných optických rovinách.
- Cílem práce je návrh, realizace a ověření funkčnosti systému využívající více obrazových zdrojů pro stanovení deformace vzorku. Systém bude realizován jako modulární, tj. využitelný jako celek či pouze jeho dílčí části pro použitelnost v rámci více experimentálních sestav ústavu K618. Ověření funkčnosti bude demonstrováno na vybraném typu experimentální zkoušky (např. SHPB) v celém svém rozsahu, tj. od procesu nasnímání obrazových dat až po vyhodnocení deformace
- Výstupem práce bude funkční řešení (po stránce mechanické i softwarové) umožňující vyhodnocení deformace z více obrazových zdrojů. K navrženým a realizovaným mechanickým dílům vytvořit kompletní výkresovou dokumentaci, softwarovou část doplnit komentáři. Funkčnost systému bude demonstrována experimentální zkouškou.



Rozsah grafických prací: nestanoven

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: J. C. Russ, F. B. Neal: The Image Processing Handbook, CRC Press, 2017
M. A. Sutton, J. J. Ortu, H. Schreier: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications, Springer, 2009

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Daniel Kytýř, Ph.D.**
Ing. Tomáš Fíla

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

Datum odevzdání diplomové práce: **17. května 2021**

- 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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Michael Hudák
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 18. prosince 2020

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité 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).

Praha, 17. května 2021

.....

Michael Hudák

Poděkování

Nejprve bych rád poděkoval vedoucím své práce doc. Ing. Danielu Kytýřovi Ph.D. a Ing. Tomáši Fílovi, Ph.D. za veškerý čas, který mi v průběhu mé práce na tomto projektu věnovali během konzultací, za cenné rady a vstřícnost. Rovněž děkuji Ing. Petru Zlámalovi, Ph.D. za věcné připomínky a Ing. Janu Faltovi za odborný dohled při návrhu elektrického zapojení.

Nelze opomenout také poděkování mé rodině, která mě neustále podporuje během mých studií.

Práce vznikla za podpory grantu Grantové agentury České Republiky, projekt č. 19-23675S a Operačního programu Věda, výzkum, vzdělávání, projekt Inženýrské aplikace fyziky mikrosvěta (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000766).

MICHAEL HUDÁK

ČVUT v Praze, Fakulta dopravní

Praha, 2021

Abstrakt

Dynamické testování pokročilých materiálů s využitím vyspělých experimentálních metod vyžaduje vývoj dodatečných zařízení, která umožní proveditelnost těchto experimentů. Předmětem práce je návrh, realizace a ověření funkčnosti zařízení, která umožňují provádět mechanické experimenty s využitím rychlé rentgenové radiografie a digitální korelace obrazu s více zdroji. V práci je detailně popsáno navržené technické řešení a jeho realizace. V závěru byly provedeny pilotní experimenty, které potvrdily funkčnost navržených zařízení.

Klíčová slova

optický polohovací systém, flash X-Ray radiografie, dělená Hopkinsonova tyč, digitální korelace obrazu

STRAIN MEASUREMENT USING MULTI-CAMERA DIGITAL IMAGE SYSTEM

MICHAEL HUDÁK

CTU in Prague, Faculty of Transportation Sciences

Prague, 2021

Abstract

Dynamic testing of advanced materials using advanced experimental methods requires the development of additional equipment that will allow the feasibility of these experiments. The subject of the thesis is the design, implementation and verification of the functionality of devices that enable to perform mechanical experiments using flash X-Ray radiography and digital image correlation with multiple sources. The thesis describes in detail the proposed technical solution and its implementation. The pilot experiments were performed and functionality of the proposed devices was verified.

Keywords

optical position system, flash X-Ray, Split Hopkinson Pressure Bar, digital image correlation

Obsah

1	Úvod	13
1.1	Motivace	14
1.2	Cíle práce	14
2	Dělená Hopkinsonova tyč	15
2.1	Popis funkční části SHPB	15
2.2	Využití SHPB	16
3	Vstupní koncepční požadavky	18
4	Návrh funkčních řešení	22
4.1	Modul polohování zrcadla	22
4.1.1	Úvod	22
4.1.2	Vnější konstrukce	23
4.1.3	Vnitřní konstrukce	26
4.2	Hybridní optický polohovací systém druhé generace	27
4.2.1	Úvod	27
4.2.2	Vnější konstrukce	27
4.2.3	Vnitřní nosná konstrukce	29
4.2.4	Křížový naklápěcí stůl	30
4.2.5	Kompatibilita s HOPS první generace	31
4.3	Mobilní polohovací stůl	32
4.4	Elektronická výbava	33
4.5	Blokové schéma	33
4.5.1	Skříň pro elektroniku	34
4.5.2	Ovládací tablo	36

5	Pilotní test systému	38
5.1	Ověřovací experiment flash X-ray	40
5.2	Ověřovací experiment při kontinuálním ozařování výkonnou rentgenkou	42
6	Závěr	43

Seznam obrázků

2.1	Schéma funkčních částí experimentálního zařízení SHPB	16
2.2	Zleva: instron, padostroj a SHPB	16
2.3	Hybridní optický polohovací systém	17
2.4	Schéma SHPB s HOPS během experimentu	17
3.1	Schematické znázornění optické aparatury pro měřící metodu DIC	19
3.2	Schéma půdorysu odstíněné místnosti	20
4.1	Společná fotografie všech vyhotovených celků	23
4.2	Model sestavy modulu polohování zrcadla se základním rozdělením podsestav	24
4.3	Vnější konstrukce modulu polohování zrcadla	24
4.4	Způsoby aretace komponent k vnější konstrukci	25
4.5	Schéma sestavy harmonické převodovky	25
4.6	Vnitřní konstrukce MPZ (a), detail harmonické převodovky (b)	26
4.7	Model sestavy HOPS 2.0 se základním rozdělením podsestav	27
4.8	Vnější konstrukce HOPS 2.0	28
4.9	Model lineárního modulu s krokovým motorem	29
4.10	Vnitřní nosná konstrukce HOPS 2.0	30
4.11	Křížový naklápěcí stůl HOPS 2.0	31
4.12	Zleva: HOPS 2.0, HOPS první generace, sestava obou zařízení	32
4.13	Mobilní polohovací stůl	33
4.14	Blokové schéma	34
4.15	Skříň pro elektronickou výbavu	35
4.16	Způsob uskladnění skříně pro elektroniku pod Mobilní polohovací stůl	36
4.17	Model sestavy ovládacího tabla	36
5.1	Schéma FXR včetně SHPB	39

5.2	Zleva: multi-anodová trubice, kondenzátorové zdroje, skříň s řídicí jednotkou . . .	40
5.3	Betonový bunkr pro odstínění rentgenového záření	40
5.4	Vybrané zaznamenané snímky s odstupem záznamu 10 mikrosekund	41
5.5	HOPS 2.0, MPZ a SHPB v betonovém bunkru FXRi	41
5.6	Osvícení zrcadla scintilátorem při kontinuálním ozařování hliníkového profilu . . .	42

Seznam použitých zkratk

SHPB: dělená Hopkinsonova tlaková tyč (Split Hopkinson Pressure Bar)

DIC: digitální korelace obrazu (Digital image correlation)

HOPS: hybridní optický polohovací systém

MPZ: modul polohování zrcadla

FXR: Flash X-ray radiografie

RTG: rentgenové záření

fps: snímky za sekundu (frames per second)

Kapitola 1

Úvod

Ústav mechaniky a materiálů na Fakultě dopravní se v rámci výzkumu a vývoje zabývá zejména dynamickým testováním pokročilých materiálů s využitím vyspělých experimentálních metod, a tomu odpovídajících experimentálních sestav a zařízení [1]. Znalost chování pokročilých materiálů v oblasti dynamického testování má v oblasti dopravy široké uplatnění, ať už se jedná o běžnou pozemní dopravu, letectví nebo kosmonautiku. Tyto materiály nelze, vzhledem, k jejich zpravidla velmi složité vnitřní struktuře a komplikovaným deformačním procesům, zkoumat za pomoci běžných experimentálních metod, jako je například tahová zkouška pomocí elektromechanického zatěžovacího stroje, rázová zkouška za pomoci padostroje atd. Proto je žádoucí k tomu využívat vyspělé experimentální metody, jako je např. měřicí metoda DIC (z ang. Digital image correlation) [2] a FXR (z ang. Flash X-ray radiography) [3, 4, 5]. Pro přesnost a proveditelnost optické měřicí metody DIC je klíčové využití kvalitních kamer a jejich přesného nastavení. V případě dynamických testů je zapotřebí využití rychlokamery, jakožto optického zdroje s velmi vysokou rychlostí snímkování. Pro měřicí metodu FXR je nutná ochrana stíněním a rovněž je klíčové kvalitní a přesné obrazové nastavení.

Náplní této práce je realizace motorizovaných polohovacích zařízení, která jsou klíčová pro celkovou realizaci experimentů prováděných ústavem v rámci metody FXR. Konkrétně se jedná o Modul polohování zrcadla a Hybridní optický polohovací systém, který ponese optický zdroj. Jejich motorizace a dálkové ovládání jsou naprosto nutné vlastnosti pro měřicí metodu FXR. Tím je zároveň zprostředkováno výrazné usnadnění příprav a provádění experimentů v rámci této metody. Tyto polohovací zařízení mají také tu výhodu, že je lze pomocí dálkového ovládání obsluhovat pouze jedinou osobou, která tak může obraz z polohovaného optického zdroje sledovat přímo od stanoviště operátora. Modely všech zařízení a výkresová dokumentace jednotlivých

dílů byly vyhotoveny za pomoci parametrického adaptivního 3D modeláře. V tomto modeláři byly nejprve vyhotoveny modely jednotlivých dílů i celých sestav a následně jejich technická dokumentace, která byla následně použita k výrobě zakázkových dílů.

Kapitola 2 vysvětleny základy zařízení SHPB (z ang. Split-Hopkinson Pressure Bar) včetně jeho využití v rámci ústavu. Kapitola 3 definuje vstupní požadavky na tyto zařízení na základě potřeb pro nově využívané měřicí metody. Kapitola 4 se zabývá důkladným popisem technického řešení polohovacích zařízení včetně elektrického zapojení. Poslední kapitola popisuje základy měřicí metody FXR a nastiňuje ověřující experiment, kdy je proveden pilotní experiment metodou FXR za pomoci realizovaných polohovacích zařízení, a tím je rovněž demonstrována jejich funkčnost a spolehlivost.

1.1 Motivace

Motivací pro vznik této diplomové práce je možnost výzkumu pokročilých materiálů velmi inovativními experimentálními metodami. Ve stávajícím stavu využívá Ústav mechaniky a materiálů na Fakultě dopravní několik experimentálních soustav, aby bylo možné popsat kompletní spektrum mechanických vlastností testovaných materiálů z hlediska rychlosti deformace. Jde zejména o elektromechanický uni-axiální zatěžovací stroj pro kvazistatické testování, padostroj a dělenou Hopkinsonovu tyč. Jako výzkumná metoda je využívána zejména digitální korelace obrazu a Flash X-ray radiografie, u které již proběhly první pilotní experimenty.

1.2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je zprovoznění modulárního zařízení využívajícího více optických zdrojů pro měření deformace. Toto zařízení bude umožňovat proveditelnost experimentů pomocí měřicí metody DIC s více zdroji, zobrazování pomocí FXR, případně rychlé radiografie. Výstupem práce je ucelené řešení splňující všechny výše uvedené požadavky.

Kapitola 2

Dělená Hopkinsonova tyč

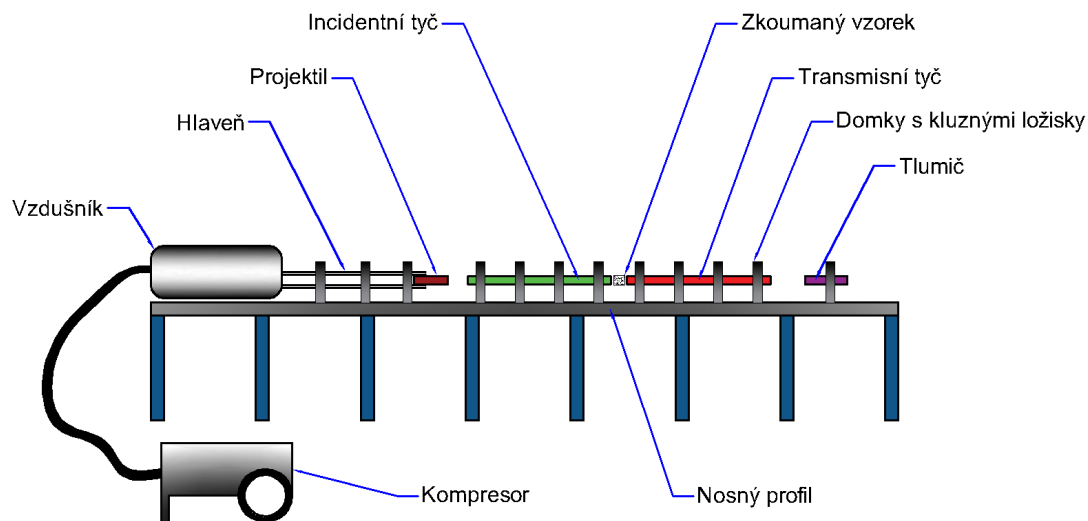
Klíčovým faktorem určujícím deformační chování pod dynamickým zatížením je rychlost deformace. U velkého množství materiálů lze pozorovat rozdílné chování při rozdílné rychlosti jejich deformace. V této kapitole je představeno experimentální zařízení Dělená Hopkinsonova tyč (dále jen SHPB¹, které je Ústavem mechaniky a materiálů na Fakultě dopravní využíváno pro měření rychlých deformací. V této kapitole je následně představen princip a využití tohoto zařízení.

2.1 Popis funkční části SHPB

Princip SHPB spočívá v šíření jednorozměrné deformační vlny. Primárními součástmi SHPB používaným v laboratoři Ústavu mechaniky a materiálů jsou vzdušník, kompresor, hlaveň, incidentní tyč a transmisní tyč. Tato koncepce se užívá zcela běžně. Projektil (tzv. striker) je vložen do hlaveň a zasunut na ústí vzdušníku. V průběhu celého experimentu deformace u těchto prvků musí proběhnout jen v elastické oblasti, neboli nemělo by dojít k přesažení meze kluzu. Mezi incidentní tyč a transmisní tyč je umístěn zkoumaný vzorek. Při otevření ventilu vzdušníku je striker urychlen tlakem vzduchu směrem k incidentní tyči. Během nárazu strikeru do incidentní tyče se vytvoří kompresní vlna, která se šíří incidentní tyčí směrem k testovanému vzorku. Při kontaktu se vzorkem dojde k jeho deformaci. Část vlny je odražena zpět do incidentní tyče (odraženým pulzem) a část pokračuje vzorkem do transmisní tyče (přenosovým pulzem). Obě tyče jsou osazeny tenzometry, pomocí kterých jsou zaznamenány všechny šířené vlny. Pro odstranění vlivu ohybu jsou tenzometry na obou tyčích zapojeny v polovičním Wheatsonově můstku. Získané hodnoty deformací vzniklých v incidentní a transmisní tyči jsou použity k výpočtu závislosti deformace na přetvoření vzorku [6]. Měřicí tyče jsou ustaveny na rovnoměrně rozmístěných kluz-

¹Z angl. *Split Hopkinson Pressure Bar*

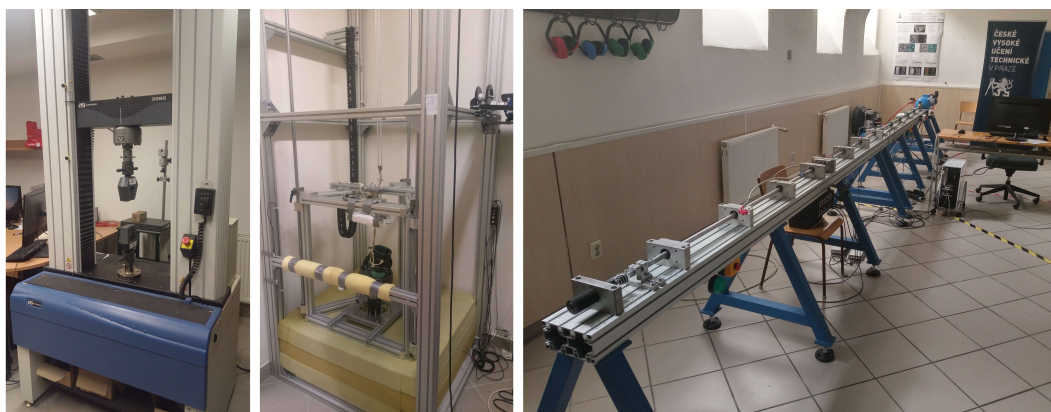
ných ložiscích. Na obrázku 2.1 je znázorněno schéma funkčních částí experimentálního zařízení SHPB.



Obrázek 2.1: Schéma funkčních částí experimentálního zařízení SHPB

2.2 Využití SHPB

Ústav mechaniky a materiálů na Fakultě dopravní využívá několik experimentálních soustav, aby bylo možné popsat kompletní spektrum mechanických vlastností testovaných materiálů. Jde zejména o elektromechanický zatěžovací stroj, padostroj a SHPB/OHPB. V případě padostroje a SHPB/OHPB se jedná o vlastní konstrukci. Na obrázku 2.2 jsou aktuální fotografie těchto zařízení. K těmto experimentálním soustavám bylo realizováno zařízení HOPS, jež je používáno

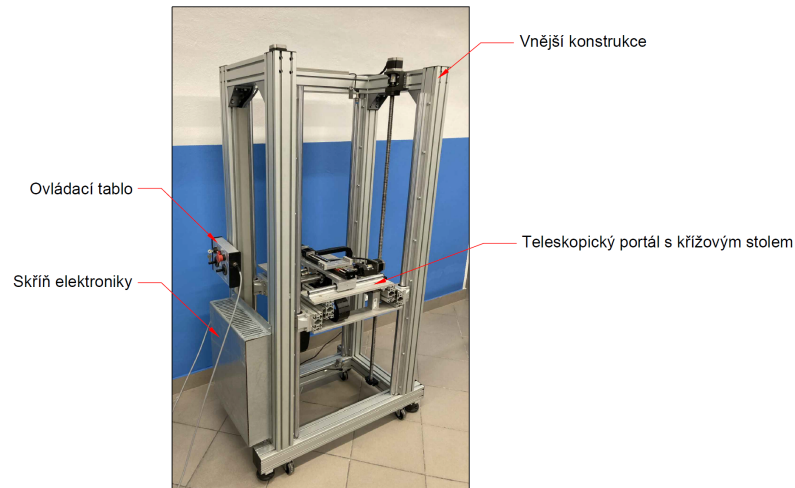


Obrázek 2.2: Zleva: elektromechanický zatěžovací stroj, padostroj a SHPB

pro měřicí metodu DIC, a které jsem vyhotovil v rámci bakalářské práce. Na obrázku 2.3 je

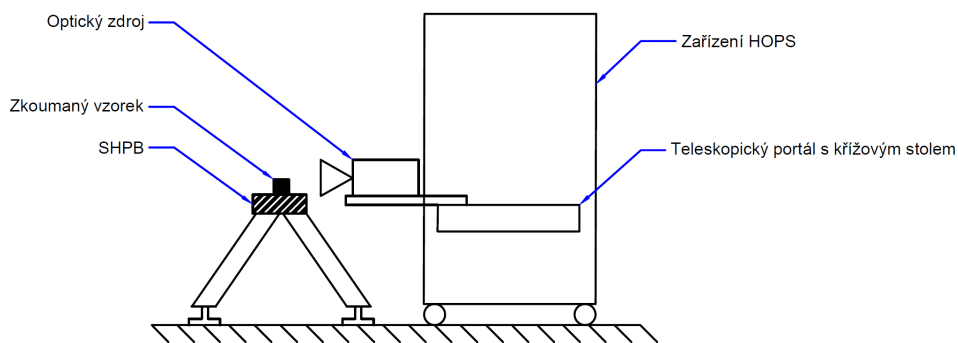
znázorněno zařízení HOPS první generace, které výrazně překonává možnosti klasických stativů a rozšiřuje funkčnost a komfort optického snímání. Toto zařízení slouží pro přesné polohování optického zdroje, což velmi zjednodušuje proces pořizování obrázků deformujícího se vzorku během experimentu.

Kompatibilita zařízení HOPS zejména s experimentálním zařízením SHPB je velmi užitečná pro



Obrázek 2.3: Hybridní optický polohovací systém

vědu a výzkum Ústavu mechaniky a materiálů na Fakultě dopravní. V minulosti již proběhlo mnoho dynamických testů s přínosnými výsledky. Testování se zabývalo například deformací vzorků z auxetické struktury [7] nebo dynamické nárazové testování pevných látek s krystalickou a mřížkovou strukturou [8]. Na obrázku 2.4 je znázorněno schéma experimentu pomocí SHPB při



Obrázek 2.4: Schéma SHPB s HOPS během experimentu

záznamu optickým zdrojem, kterým polohuje zařízení HOPS. V současnosti se provádí integrace zařízení SHPB/OHPB do experimentální sestavy FXR. Díky této integraci bude možné provádět zcela unikátní vědecký výzkum.

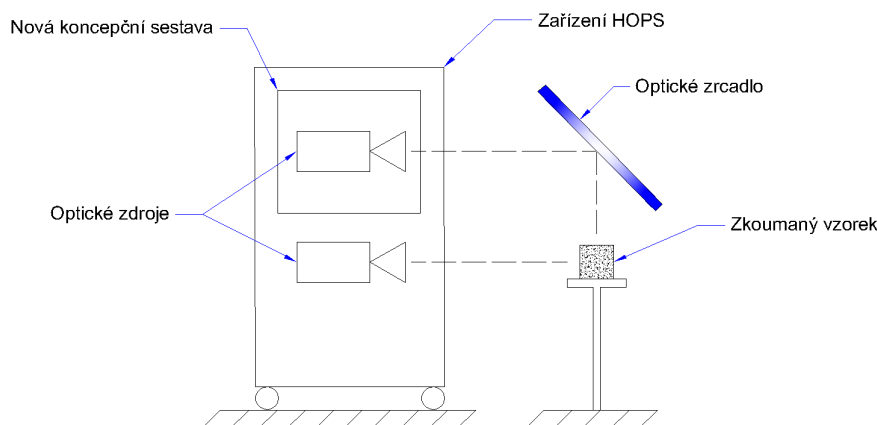
Kapitola 3

Vstupní koncepční požadavky

V této kapitole budou definovány vstupní požadavky na zařízení realizované v rámci této práce. Tyto požadavky vychází ze zkušeností se zařízením HOPS, jenž je používáno pro měřicí metodu DIC [9, 10]. Ve výchozím stavu zařízení HOPS umožňuje pozorování deformace vzorku pomocí metody DIC jen z jedné strany, a to jediným optickým zdrojem. Nové požadavky cílí na možnosti zkoumat deformaci vzorku se dvěma optickými zdroji [11, 12]. První možností je pozorování z více stran, kde se každý optický zdroj soustředí právě na jednu určenou stranu. Druhou možností je zkoumat stejnou stranu vzorku oběma optickými zdroji. V rámci experimentů pomocí měřicí metody FXR procházejí zkoumaným vzorkem rentgenové paprsky, které poté dopadají na scintilátor, což je optická vrstva, která zprostředkovává převod ionizujícího záření na viditelného světlo, které je následně detekováno optickým zdrojem. Zároveň je zařízení velmi nákladné a značně náchylné (především optická vrstva) k degradaci a poškození. Celá aparatura musí také být kvůli bezpečnosti umístěna v odstíněné místnosti, aby pracovníci a nebyli vystavováni rentgenovému záření. Měřicí metoda FXR je blíže specifikována v kapitole 5.

Pro pokročilé aplikace metody DIC se ukázalo být velmi výhodné využít již existující zařízení HOPS, které by tak sloužilo jako základna pro umístění druhého optického zdroje za předpokladu, že by tímto optickým zdrojem bylo možné polohovat separátně. Dále je nezbytné do sestavy vhodně umístit polohovatelné optické zrcadlo tak, aby se jím promítal obraz deformovaného vzorku z další strany do příslušného optického zdroje. Pro názornost těchto požadavků je na obrázku 3.1 znázorněno schéma způsobu sestavení měřicí aparatury.

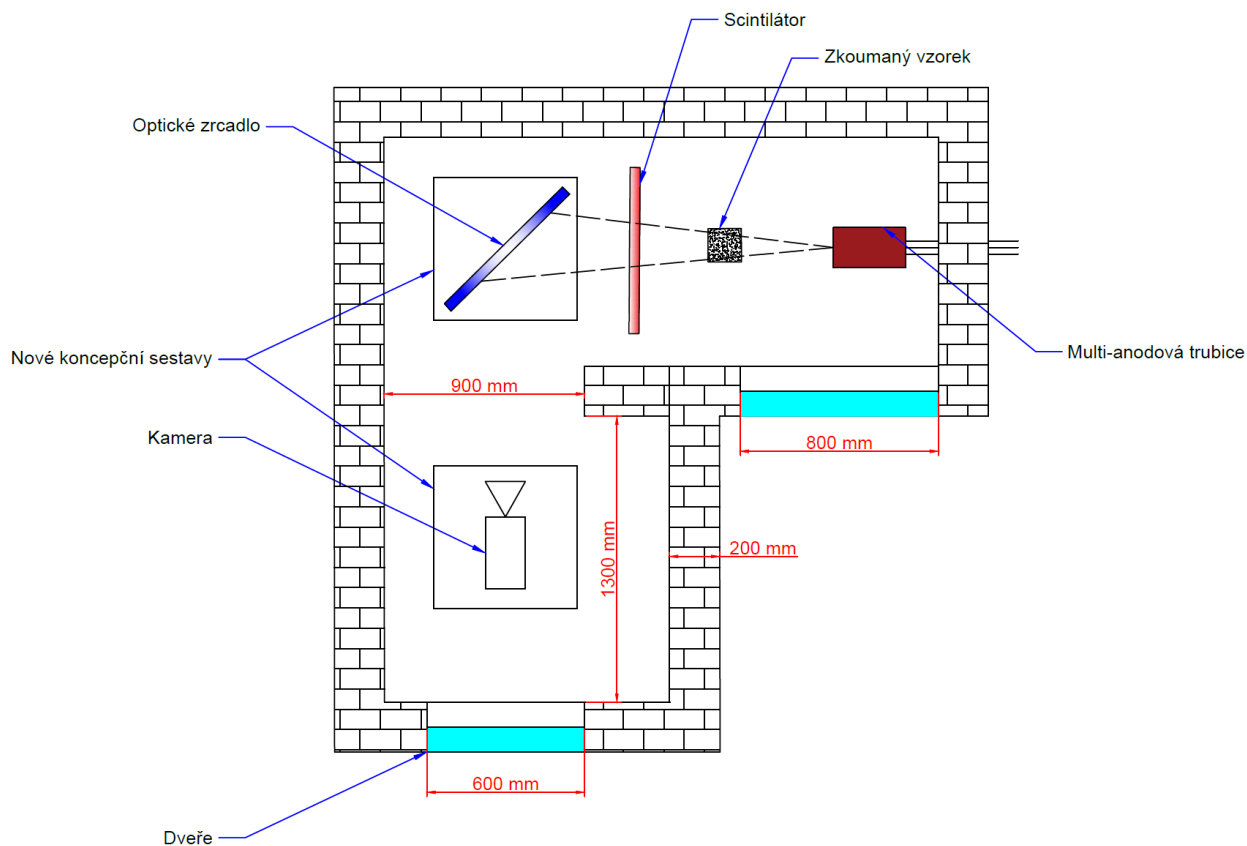
Prvním požadavkem pro metodu FXR je zajištění polohovatelného optického zrcadla, které odrazí optický výstup od scintilátoru do optického zdroje. To je potřeba z toho důvodu, že pokud by byl optický zdroj v přímém svazku od zdroje RTG, docházelo by k výraznému poškození



Obrázek 3.1: Schematické znázornění optické aparatury pro měřící metodu DIC

jeho elektroniky vlivem záření. Druhým požadavkem je, aby optický zdroj nemusel být umístěn na běžný stativ, ale na motorizované polohovací zařízení, což kvůli omezeným prostorům odstíněné místnosti není možné zajistit původním zařízením HOPS. Důvodem tohoto požadavku je, že během spuštěného RTG zdroje již není možné manuálně nastavovat polohu optického zdroje uvnitř odstíněné místnosti kvůli ionizujícímu záření. V takovém stavu by bylo měření kvůli bezpečnosti obsluhy značně komplikované. Pro názornost je na obrázku 3.2 znázorněno funkční schéma uvnitř odstíněné místnosti s rozmístěním komponent.

Vstupní požadavky pro obě měřící metody tedy vyžadují realizaci dvou polohovacích zařízení pro zrcadlo a optický zdroj. Zároveň se při dimenzování těchto zařízení musí zohlednit omezený prostor uvnitř odstíněné místnosti, různá výška zkoumaného vzorku pro možnost budoucí výměny experimentálních zařízení. Pro měření v rámci metody DIC je rovněž nutné zohlednit kompatibilitu se zařízením HOPS. Jednotlivá zařízení musí být mobilní a plně motorizována s možností je dálkově ovládat jedinou osobou přímo od monitoru počítače, kde bude přímo vidět grafický výstup snímáný optickým zdrojem. Z důvodu zabezpečení nákladných polohovaných optických zdrojů (například rychlokamery) je základním požadavkem osadit motorizované osy brzdami pro případ náhlého vypnutí proudu. Zejména z důvodu omezené šířky stíněného průchodu pro kabeláž musí být skříň pro elektroniku navrhována jako externí, přičemž ke každému polohovacímu zařízení by měl v ideálním případě vést jediný propojovací kabel. Rovněž se tato skříň pro elektroniku neobejde bez integrované desky plošných spojů. Právě u zařízení HOPS se ukázalo, že pouhé tři motorizované osy vyžadují velmi rozsáhlou kabeláž, kterou bylo velmi obtížné přehlednit. Celá navrhovaná sestava by měla být rovněž vybavena dostatečně dlouhými



Obrázek 3.2: Schematické znázornění půdorysu odstíněné místnosti včetně rozmístění komponent propojovacími kabely mezi jednotlivými funkčními celky, aby bylo například možné bezpečně rozmístit obě zařízení uvnitř odstíněné místnosti v rámci měření metodou FXR. V následující kapitole je popsáno, jakým způsobem byl tento komplexní problém vyřešen. Pro názornost je zde ještě uvedeno bodové shrnutí nejdůležitějších požadavků:

- polohovací zařízení pro optické zrcadlo
- polohovací zařízení pro optický zdroj
- kompatibilita obou navrhovaných zařízení s HOPS
- zohlednění prostorových limitů odstíněné místnosti
- dálková ovladatelnost obou polohovacích zařízení od stanoviště operátora
- externí skříň pro elektroniku včetně integrované desky plošných spojů
- minimalizace kabeláže vedoucí k polohovacím zařízením do odstíněné místnosti
- ochrana scintilátoru při manipulaci

- osazení některých motorizovaných os brzdou pro případ náhlého vypnutí proudu
- zajištění mobility všech sestav

Kapitola 4

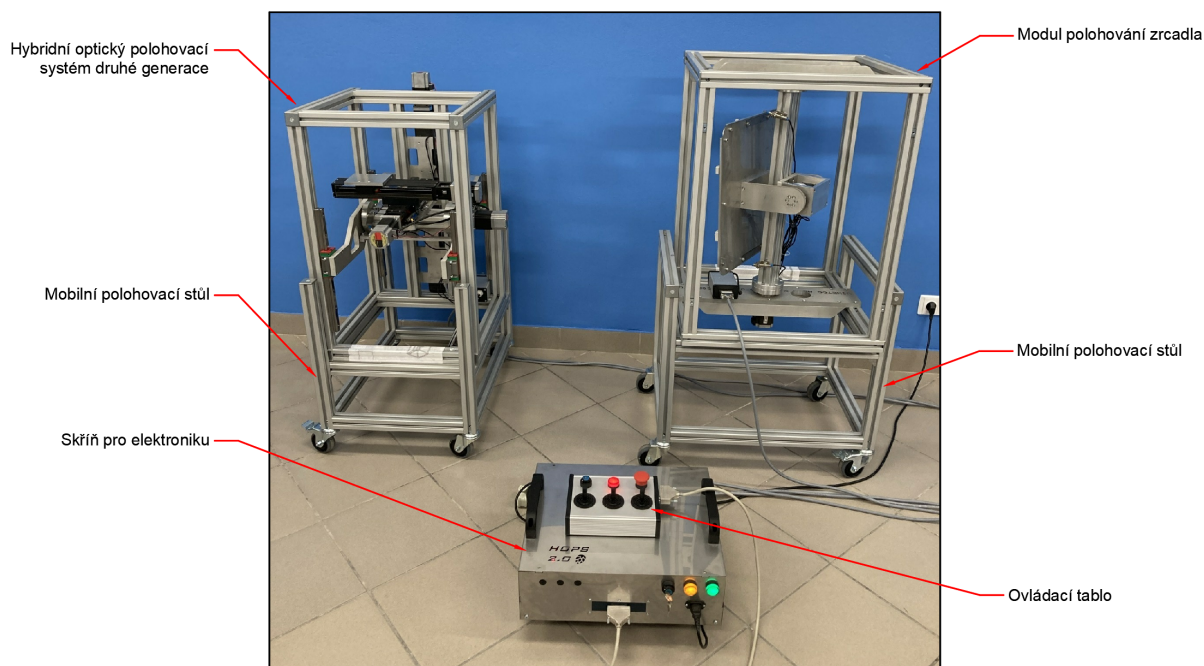
Návrh funkčních řešení

V této kapitole jsou podrobně popsána zařízení, jejichž účelem je umožnit proveditelnost a podpořit automatizaci příprav experimentů. Jedná se o dvě polohovací zařízení: Modul polohování zrcadla (MPZ), který zajišťuje polohování optické odrazové aparatury se scintilátorem a Hybridní optický polohovací systém druhé generace (HOPS 2.0), který polohuje optickým zdrojem. Díky obdobným požadavkům na polohování jednotlivých os obou zařízení byl kladen důraz na unifikaci stejných prvků pro urychlení návrhu, výroby a úspory nákladů. Dále je zde popsáno řešení Mobilního polohovacího stolu pro snadnou manipulaci s polohovacími zařízeními a v poslední části je zde podrobně popsána elektronická výbava: Skříň pro elektroniku, která skrze propojovací kabeláž komunikuje s ostatními sestavami a Ovládací tablo pro dálkové řízení. Na obrázku 4.1 jsou znázorněny všechny celky včetně jejich propojení prodlužovacími kabely a zapojení do elektrické sítě.

4.1 Modul polohování zrcadla

4.1.1 Úvod

V reakci na požadavky ohledně polohovatelného zrcadla definovaných v kapitole 3 bylo navrženo a realizováno zařízení MPZ. Toto zařízení bylo vyhotoveno jako dvouosý, plně motorizovaný polohovací systém, který je dálkově ovladatelný. Klíčovou vlastností tohoto zařízení je, že umožňuje, aby optický zdroj mohl být umístěn mimo osu zkoumaného objektu, což je velmi výhodné pro metodu DIC s více zdroji. Rovněž tato vlastnost umožňuje, aby mohl být optický zdroj chráněn před dopadem rentgenových paprsků v rámci metody FXR, což je rovněž patrné ze schématu na obrázku 3.2. V případě rychlých deformací zkoumaného vzorku, při kterých mohou



Obrázek 4.1: Společná fotografie všech vyhotovených celků

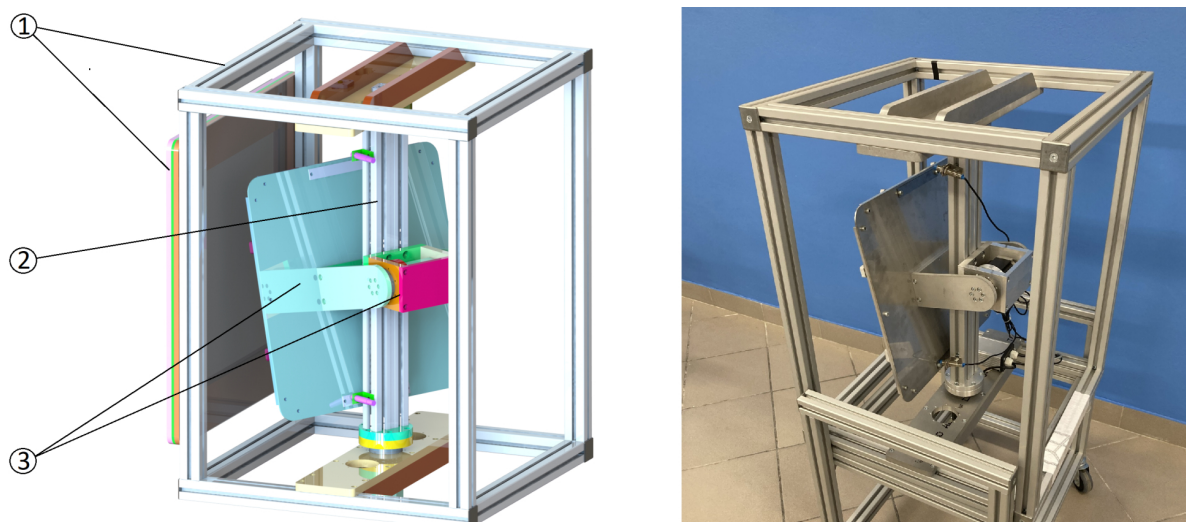
odlétávat jejich úlomky, umožňuje navíc MPZ umístit optický zdroj tak, aby byl mimo dosah těchto úlomků. Na obrázku 4.2 je znázorněn model zařízení modulu polohování zrcadla včetně označení funkčních celků. Celá sestava je rozdělena na vnější konstrukci (1), sestavu harmonické převodovky (2) a vnitřní konstrukci (3). Výkresová dokumentace všech dílů pro potřeby výroby a model celé sestavy zařízení Modulu polohování zrcadla viz. příloha 1.

4.1.2 Vnější konstrukce

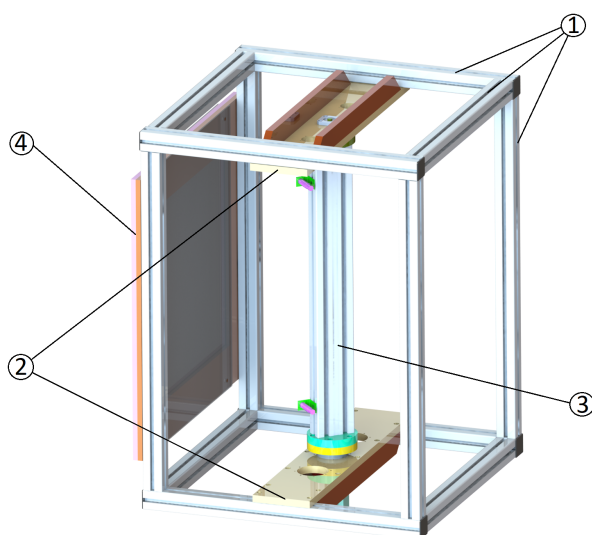
Vnější konstrukce zajišťuje nosnou funkci, tuhost a rotační polohování v jedné ose. Model sestavy je znázorněn na obrázku 4.3. Tuhost je zajištěna profily z hliníkové slitiny o průřezu 40×40 mm (40x40L, Bosch Rexroth s.r.o., Česká republika) (1), které jsou k sobě vzájemně sešroubovány. K protilehlým profilům přiléhají dvě nosné desky (2), které fixují sestavu harmonické převodovky pro zajištění rotačního pohybu (3).

Sestava je z vnější strany vybavena pouzdrem (4), do kterého je umístěn scintilátor. Pouzdro scintilátoru je osazeno odnímatelnými polykarbonátovými kryty, aby byla zajištěna ochrana scintilátoru během manipulace se zařízením.

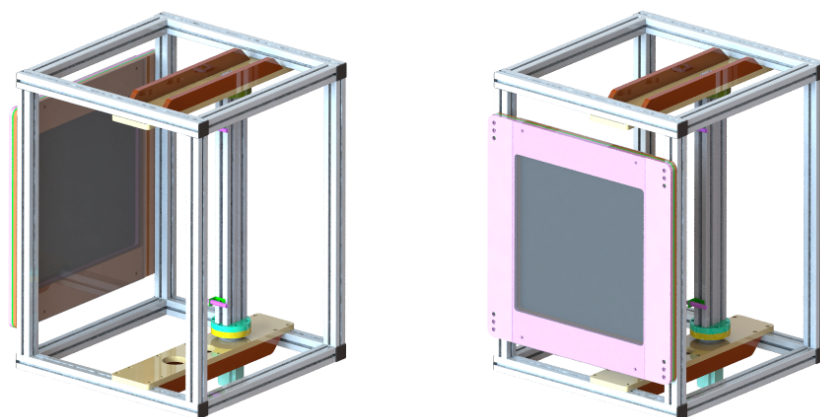
Hlavní předností tohoto řešení je, že sestava harmonické převodovky nemusí být umístěna vycentrovaně vůči horizontálním osám. To je umožněno díky tomu, že nosné desky jsou vybaveny dodatečnými montážními otvory pro upevnění v dalších pozicích. Dále lze také nosné desky po-



Obrázek 4.2: Model sestavy modulu polohování zrcadla se základním rozdělením podsestav souvat v ose profilů, ke kterým jsou upevněny. Rovněž má půdorys modulu čtvercový charakter, což umožňuje aretaci pouzdra scintilátoru z libovolné vertikální strany. Tyto vlastnosti modulu jsou velmi přínosné v rámci obou měřících metody DIC a FXR, jelikož bude docházet ke změnám prostorových podmínek kvůli zamýšleným obměnám experimentálních zařízení. Na obrázku 4.4 jsou znázorněny další možné způsoby aretace osy harmonické převodovky a pouzdra scintilátoru k vnější konstrukci.



Obrázek 4.3: Vnější konstrukce modulu polohování zrcadla

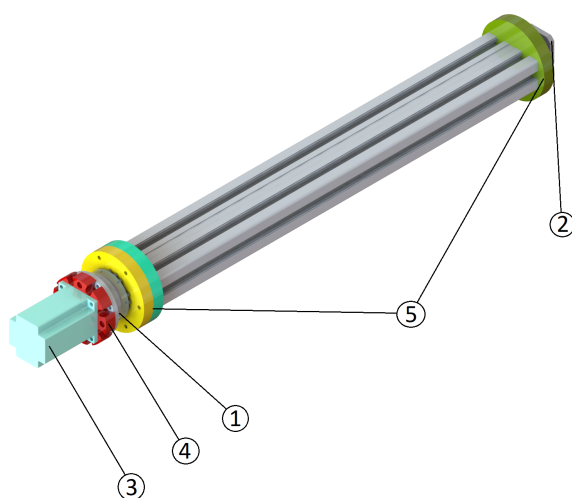


Obrázek 4.4: Ukázka dalších způsobů aretace osy harmonické převodovky a pouzdra scintilátoru k vnější konstrukci

Sestava harmonické převodovky

Schéma sestavy harmonické převodovky je znázorněno na obrázku 4.5. Rotační část sestavy je z jedné strany ukotvena k harmonické převodovce (CSG-17-80-2UH, Harmonic Drive SE, Německo) (1) a z druhé strany volně uchycena k ložiskové jednotce (FF12, SYK Sonyung Industry, Taiwan) (2). Rotaci zajišťuje krokový motor (57CM23-4A, Leadshine Technology, USA) (3), přičemž je přes redukcí (4) připojen k harmonické převodovce, která zvětšuje kroučící moment, tuhost a upravuje rychlost otáčení sestavy. Pro funkčnost a montáž této sestavy bylo zapotřebí navržení dodatečných redukcí (5).

Během návrhu tohoto zařízení byla jako reduktor upřednostněna harmonická převodovka díky



Obrázek 4.5: Schéma sestavy harmonické převodovky

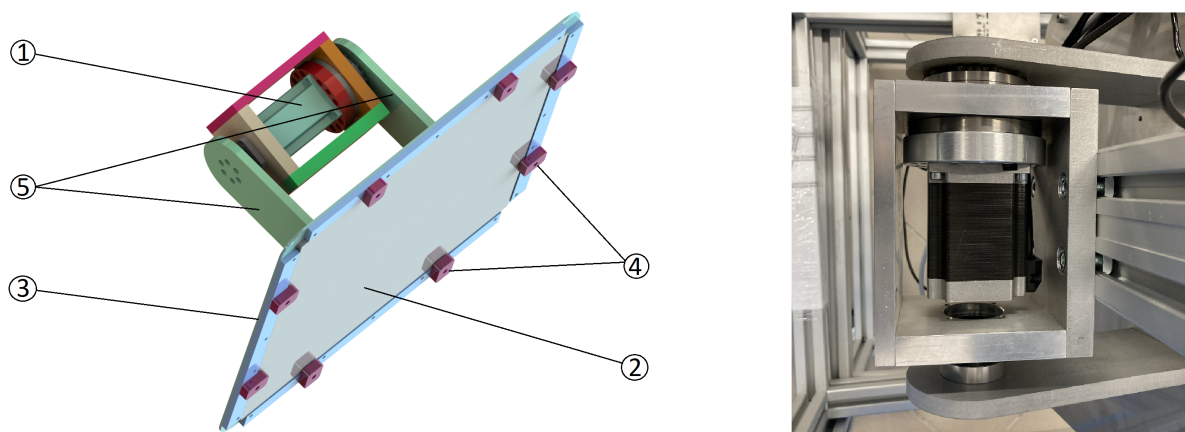
jejím přednostem, jako je vysoká tuhost, plynulý pohyb, velký momentový přenos a žádná vůle. Jako pohonná jednotka byl vybrán krokový motor. Bylo tak učiněno z toho důvodu, že jeho řešení disponuje vysokým výkonem vzhledem k jeho rozměrům a pořizovacím nákladům, nízkonapěťovým napájením a kompatibilitou s cenově dostupnými drivery. Pro nosnou část poháněné osy byl upřednostněn profil z hliníkové slitiny namísto běžného jeklu nebo standardní trubky. Díky tomu lze k profilu snadno upevnit vnitřní konstrukci v libovolné pozici v jeho ose.

4.1.3 Vnitřní konstrukce

Na obrázku 4.6 (vlevo) je znázorněn model vnitřní konstrukce MPZ. Vnitřní konstrukce zprostředkovává rotační pohyb v druhé ose, který je umožněn díky obdobné sestavě harmonické převodovky (1) (obrázek 4.6, vpravo). V tomto případě je úhel pootočení značně omezen rozměry zrcadla (2), tudíž nepřesahuje 10° na obě strany pootočení. Z tohoto důvodu je vnější konstrukce vybavena indukčními koncovými spínači (IPS-12POC4B, Ibest Electrical, Čína), které v součinnosti s driverem omezují pohyb osy tak, aby nedošlo ke kolizi zrcadla s okolní konstrukcí.

Zrcadlo je uloženo v objímce (3) a fixováno pomocí navržených upínacích kamenů (4). Rotační pohyb je ze sestavy harmonické převodovky přenesen na objímku zrcadla prostřednictvím nosných redukcí (5).

Objímka zrcadla byla navržena tak, aby mezi ní a optickým zrcadlem byla dostatečná vůle pro aplikaci gumové podložky. Tato gumová podložka objímá zrcadlo zespod a ze stran. Nakonec je upínacími kameny jemně sevřena k vnějším okrajům zrcadla z přední strany, aby bylo pevně uloženo.

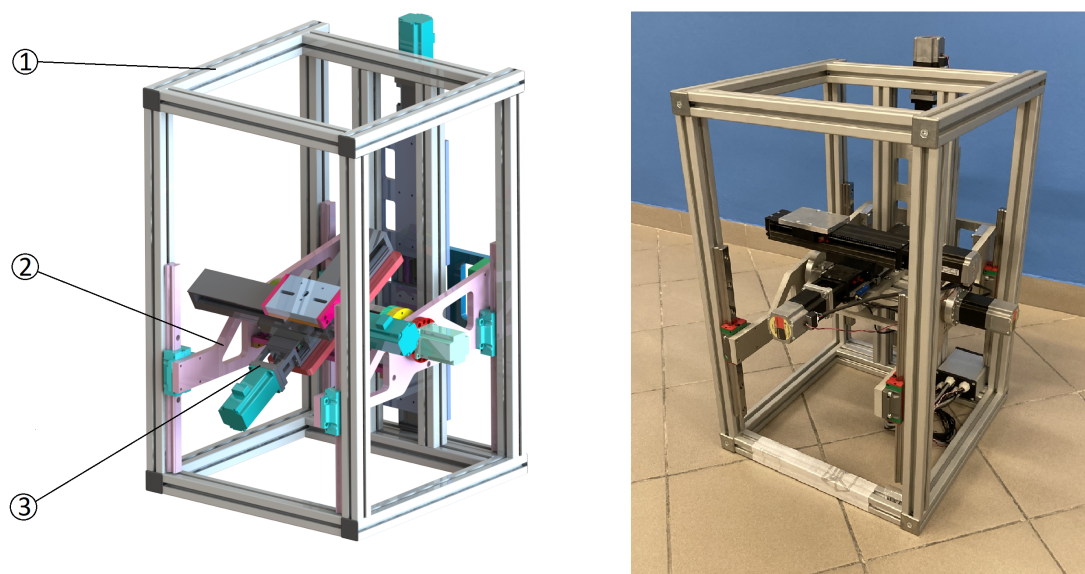


Obrázek 4.6: Vnitřní konstrukce MPZ (a), detail řešení sestavy harmonické převodovky (b)

4.2 Hybridní optický polohovací systém druhé generace

4.2.1 Úvod

Dle požadavků na polohovací zařízení pro optický zdroj definovaných v kapitole 3 bylo navrženo a realizováno zařízení HOPS 2.0. Jedná se o trojosý plně motorizovaný polohovací systém včetně možnosti naklápění křížového stolu. Zařízení je rovněž dálkově ovladatelné přímo od stanoviště operátora. Hlavní rozdíl oproti předešlé generaci má HOPS 2.0 menší vnější rozměry, aby plně vyhovoval manipulaci ve vnitřních prostorách odstíněné místnosti v rámci experimentů prováděných měřicí metodou FXR. Dále zařízení disponuje kompatibilitou s předešlou generací HOPS, což jsou klíčové vlastnosti pro užití v rámci měřicí metody DIC s více zdroji. Na obrázku 4.7 je znázorněn model sestavy HOPS 2.0 včetně označení funkčních celků. Celá sestava je rozdělena na vnější konstrukci (1), vnitřní nosnou konstrukci (2) a křížový naklápěcí stůl (3). Výkresová dokumentace všech dílů vyrobených na zakázku a model celé sestavy zařízení Modulu polohování zrcadla viz. příloha 2.



Obrázek 4.7: Model sestavy HOPS 2.0 se základním rozdělením podsestav

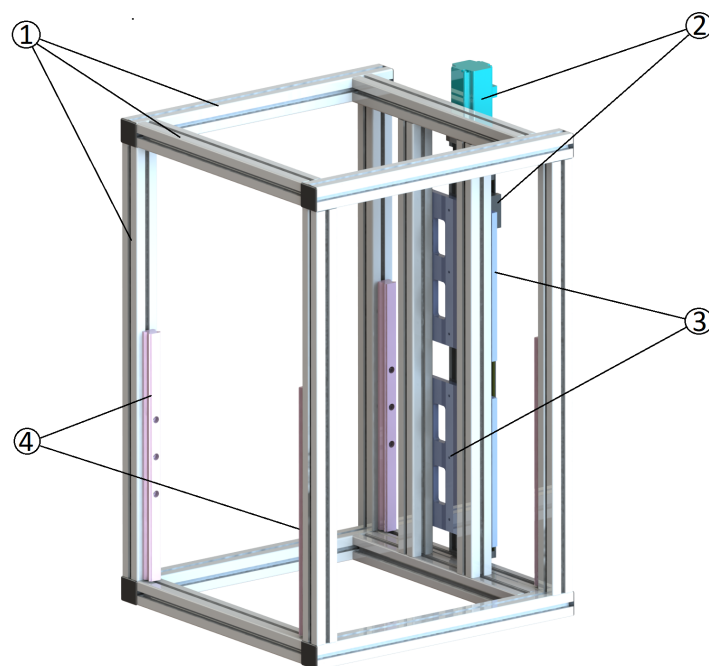
4.2.2 Vnější konstrukce

Vnější konstrukce zajišťuje nosnost, tuhost a polohování ve vertikální ose. Model sestavy je znázorněn na obrázku 4.8. Tuhost je zajištěna profily z hliníkové slitiny o průřezu 40×40 mm (40x40L, Bosch Rexroth s.r.o., Česká republika) (1), které jsou k sobě vzájemně sešroubovány. Vertikální polohování je zprostředkováno lineární osou KK s délkou posuvu 600 mm (KK6005P-

600A2, Hiwin, Japonsko) (2), která je k hliníkovým profilům fixována pomocí navržených redukčních desek (3).

Polohování ve vertikální ose je vedeno čtveřicí shodných kolejnic lineárního vedení (HGR25R, Hiwin, Japonsko) (4) připevněných k profilům z hliníkové slitiny vnější konstrukce. Vnitřní nosná konstrukce je vedena přes přírubové vozíky (QHW25HC, Hiwin, Japonsko) s oběžnými kuličkami. Pohyb v této ose je kvůli možným kolizím v obou směrech omezen koncovými indukčními spínači, kterými je vybaven krytovaný lineární modul KK.

Vnější rozměry tohoto řešení jsou navrženy tak, aby splňovaly kompatibilitu se zařízením HOPS první generace, a zároveň dispoziční omezení ve vnitřních prostorech odstíněné místnosti. Tím jsou splněny rozměrové požadavky pro měřicí metody DIC s více zdroji a FXR.



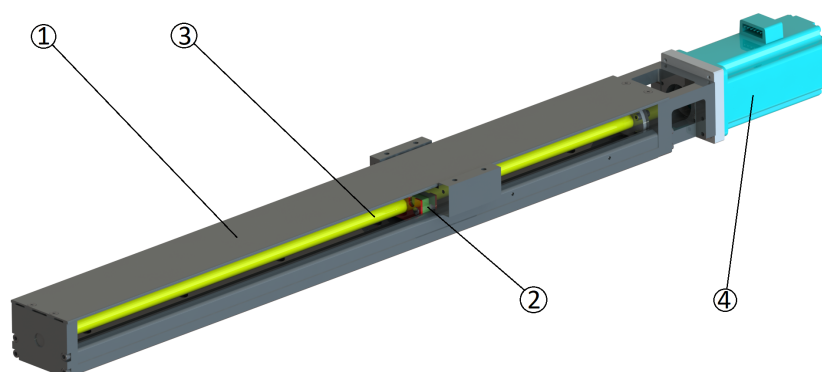
Obrázek 4.8: Vnější konstrukce HOPS 2.0

Lineární osa KK

Model lineárního modulu je znázorněn na obrázku 4.9. Jedná se o krytovanou konstrukci (KK26-005C-600A1-M1BCD) (1) s integrovaným vozíkem (2), kterým je v lineárním směru pohybováno pomocí otáčení kuličkového šroubu (3). Sestava je dále vybavena krokovým motorem s brzdou (PKP268D28M, Oriental Motor, Japonsko) (4), který v konstrukci otáčí kuličkovým šroubem. Rovněž jsou zde integrovány koncové indukční spínače pro omezení lineárního posuvu vozíku. Jelikož jsou tyto spínače aretovány na speciální liště, lze jejich polohu měnit a tím omezit pohyb

vozíku dle potřeby.

Moduly lineární osy KK disponují vysokou přesností polohování (0,025 mm) oproti běžným sestavám kuličkových šroubů, proto byly pro toto řešení upřednostněny. Důvod k použití brzdy u krokových motorů je ten, že je počítáno s použitím nákladných zařízení (zejména rychlokamery). Krokové motory s brzdou zabraňují samovolnému pohybu vlivem velkého zatížení ve směru osy kuličkového šroubu. To zajistí jejich statickou polohu také při výpadku napájení.

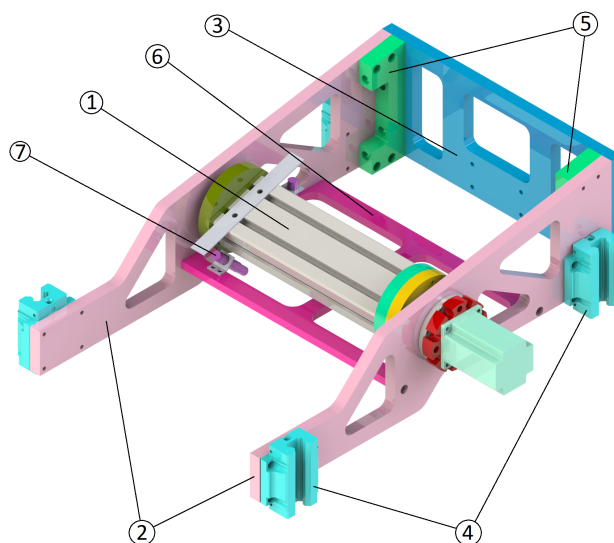


Obrázek 4.9: Model lineárního modulu s krokovým motorem

4.2.3 Vnitřní nosná konstrukce

Funkcí vnitřní nosné konstrukce je umožnit dopředné naklápění křížového stolu. Zároveň musí mít dostatečnou tuhost kvůli odsazené lineární ose KK pro vertikální posuv. Model sestavy vnitřní nosné konstrukce je znázorněn na obrázku 4.10. Naklápění křížového stolu zajišťuje sestava harmonické převodovky (1), která přenáší zatížení z křížového stolu na boční nosné desky (2). Tyto desky zatížení dále přenášejí na zadní nosnou desku (3), která je aretována k lineární ose KK pro vertikální posuv. Dalšími komponentami pro vedení vertikálního posuvu jsou přírubové vozíky (QHW25HC, Hiwin, Japonsko) (4) umístěné z vnější strany bočních nosných desek pro kolejnice na vnější konstrukci. Pro dosažení požadované tuhosti je vnitřní nosná konstrukce vybavena modifikovanými úhelníky (5), které podporují spojení nosných desek, a příčnou deskou (6). Sestava je dále vybavena koncovými indukčními spínači (IPS-12POC4B, Ibest Electrical, Čína) (7) pro vyloučení kolizí s křížovým naklápěcím stolem.

Zejména pro experimentální měřicí metodu DIC s více zdroji musí naklápění křížového stolu umožnit soustředění optických zdrojů do stejného místa na zkoumaném vzorku. Zároveň by bez této funkce byla značně ztížena příprava experimentu metodou DIC, kde se každý optický zdroj soustředí na odlišnou stranu zkoumaného vzorku.

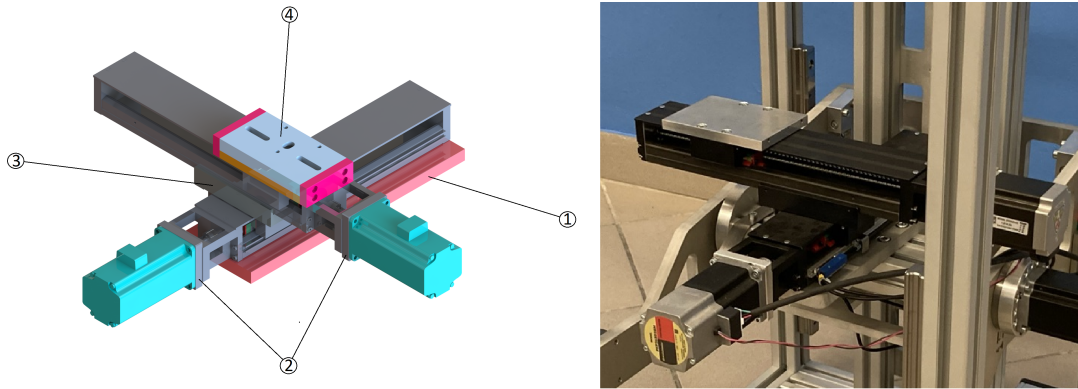


Obrázek 4.10: Vnitřní nosná konstrukce HOPS 2.0

4.2.4 Křížový naklápěcí stůl

Křížový naklápěcí stůl zajišťuje polohování optického zdroje ve dvou osách v rámci horizontální roviny. Model sestavy křížového naklápěcího stolu je znázorněn na obrázku 4.11. K sestavě harmonické převodovky je fixován spodní redukční deskou (1), na které jsou umístěny identické lineární osy KK (KK26005C-300A1-M1BCD, Hiwin, Japonsko) (2) pro možnost ostření optického zdroje a pohyb do stran. Jejich spojení realizuje mezipříruba pro spojení os KK (10-000613, Hiwin, Japonsko) (3). Sestava je také vybavena sestavou adaptéru (4) pro možnost aretace různých optických zdrojů.

Přesnost osy pro zaostřování obrazu je klíčová vlastnost pro experimentální metody DIC s více zdroji a FXR. Díky této funkci v součinnosti s dálkovým ovládním může obsluha zaostřit optický zdroj přímo od stanoviště operátora.



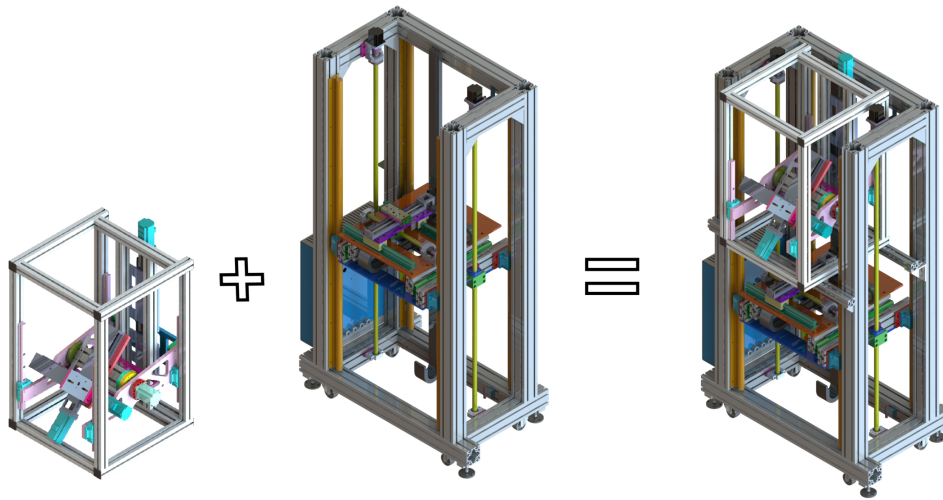
Obrázek 4.11: Křížový naklápěcí stůl HOPS 2.0

4.2.5 Kompatibilita s HOPS první generace

Pro přesnost metody DIC jsou klíčová kvalitní obrazová data, která lze získat za pomoci správného obrazového nastavení. Ke snadnému získání kvalitních obrazových dat využívá Ústav Mechaniky a materiálů na Fakultě dopravní zařízení HOPS první generace, které překonává funkci běžného stativu a výrazně rozšiřuje funkčnost a komfort optického snímání. Rovněž je kompatibilní se všemi experimentálními soustavami (padostroj, elektromechanický zatěžovací stroj, SHPB atd.), která využívají metodu DIC.

HOPS první generace je navržen jako tříosý polohovací systém, který je plně motorizovaný. Zvýšený důraz byl kladen na přesnost osy určené k zaostřování obrazu. Zařízení je dále vybaveno pojezdovými koly pro zajištění jeho mobility a možností teleskopického výsuvu křížového stolu pro překlenutí např. přečnávajících hran rámců experimentálních sestav. Zařízení HOPS tedy umožňuje spolehlivé optické měření v rámci více experimentálních sestav s výrazně odlišnými požadavky na umístění optické soustavy a snadný přesun mezi nimi [13].

Pro přesnost metody 3D DIC je klíčové vzájemné ustavení kamer. Tohoto ustavení lze dosáhnout umístěním HOPS 2.0 do HOPS první generace, přičemž bude možné oběma zařízeními nezávisle polohovat. Na obrázku 4.12 je znázorněna jejich společná aretace, při které lze ve všech osách polohovat oběma optickými zdroji včetně os na zaostřování obrazu a lze provést měření metodou DIC s více zdroji.

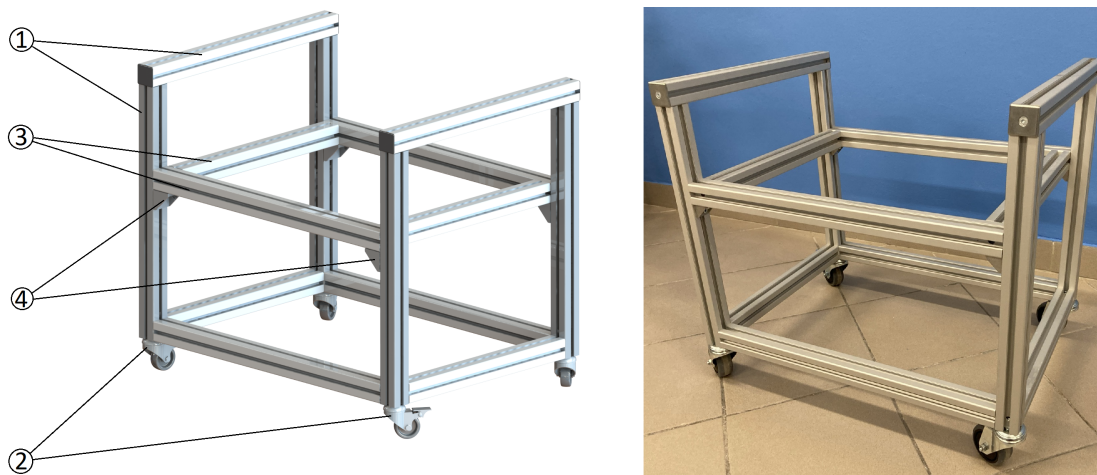


Obrázek 4.12: Zleva: HOPS 2.0, HOPS první generace, sestava obou zařízení

4.3 Mobilní polohovací stůl

Na obrázku 4.13 je znázorněn Mobilní polohovací stůl, který plní dvě hlavní funkce: Zajišťuje rychlý a pohodlný přesun neseného zařízení po laboratoři a umožňuje dodatečné vertikální ustavení. Je navržen takovým způsobem, aby mohl být použit buď pro Modul polohování zrcadla nebo HOPS 2.0, proto jsou vyhotoveny dva kusy, aby mohla být obě polohovací zařízení využívána zároveň. Jeho dodatečné vertikální ustavení je navrženo tak, aby optické zdroje v polohovacích zařízeních mohly dostat zkoumané vzorky do zorného pole ve všech experimentálních zařízeních na Fakultě dopravní.

Tuhost stolu je dána vzájemně sešroubovanými profily z hliníkové slitiny o průřezu 40×40 mm (40x40L, Bosch Rexroth s.r.o., Česká republika) (1). Pojezd je realizován pomocí kol (Caster wheel, Bosch Rexroth s.r.o., Česká republika) (2). Vnitřní patro stolu (3) je k vnější konstrukci stolu aretováno pomocí čtyř úhelníků (30/30, Bosch Rexroth s.r.o., Česká republika) (4) pro možnost změny vertikální polohy vnitřního patra před umístěním polohovacího zařízení. Výkresová dokumentace a model celé sestavy zařízení Mobilního polohovacího stolu viz. příloha 3.



Obrázek 4.13: Mobilní polohovací stůl

4.4 Elektronická výbava

Hlavním požadavkem na elektronickou výbavu pro proveditelnost experimentů v rámci měřicí metody FXR byla minimalizace kabeláže vedoucí do odstíněné místnosti kvůli omezené šířce stíněného průchodu. Z toho důvodu byly komponenty elektronického zapojení rozmístěny ve třech celcích. Prvním celkem jsou jednotlivá polohovací zařízení, která obsahují krokové motory a indukční koncové spínače. Druhým celkem je externí skříň pro elektroniku obsahující elektronické obvody pro řízení krokových motorů. Třetím celkem je dálkové ovládací tablo, jehož komponenty jsou určeny k dálkovému řízení obou polohovacích zařízení MPZ a HOPS 2.0.

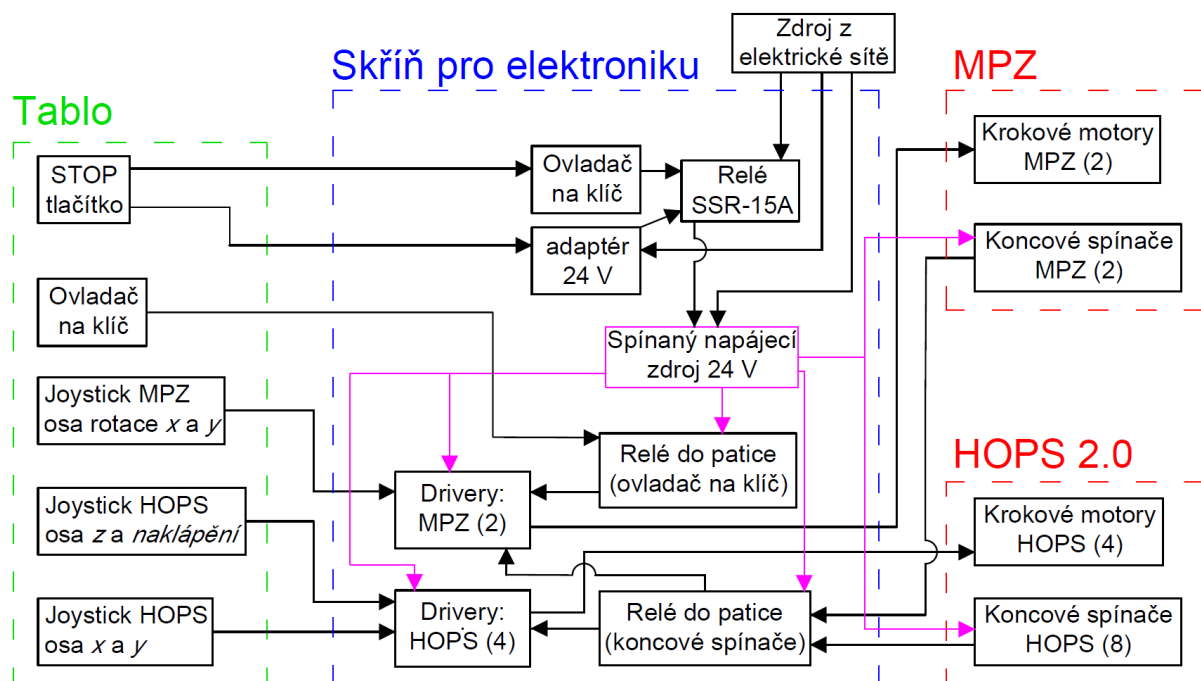
Díky integraci dostatečně dlouhé propojovací kabeláže lze mít skříň pro elektroniku umístěnou vně odstíněné místnosti a ovládací tablo přímo na stanovišti operátora. Tím je umožněno provádět měření FXR a DIC s více zdroji.

4.5 Blokové schéma

Na obrázku 4.14 je znázorněno blokové schéma. Napájení všech elektronických součástí zkonstruovaného zařízení je realizováno pomocí spínaného zdroje, který je napájen síťovým napětím. K zabezpečení systému bylo nutné realizovat prvky umožňující přímé odpojení napájecího zdroje od síťového napětí. K tomuto účelu slouží kombinace ovládacího klíče na šasi zařízení v kombinaci se E-stop tlačítkem na ovládacím tablu zařízení. Obě tyto komponenty umožňují nezávislé odstřižení napájecího zdroje od síťového napětí. Tato funkcionality je realizována pomocí elektromagnetického relé. Nízké napětí je přivedeno ze standardního stejnosměrného 24 V adaptéru,

kteřý je jako jediná komponenta připojen přímo na síťové napětí 230 V, a vedeno právě přes výše zmiňované bezpečnostní prvky (klíč, E-stop) sloužící pro spínání relé. Je tedy zaručeno, že při absenci otočení klíče na či iniciaci E-stop tlačítka není síťové napětí 230 V přivedeno na napájecí zdroj ani na jiné části zařízení a lze tedy v tomto stavu považovat všechny elektro mechanické prvky za bezpečně vypnuté (odpojené od napětí).

Drivery napájené spínaným napájecím zdrojem obstarávají řízení krokových motorů umístěných na polohovacích zařízeních a jsou řízeny joysticky umístěnými na ovládacím tablu. Těmito drivery bylo rovněž vybaveno zařízení HOPS, kde byly osvědčeny jako spolehlivé, jelikož splňují veškeré požadavky na řízení krokových motorů pro danou aplikaci. Ovládací tablo je rovněž vybaveno ovladačem na klíč, který v kombinaci s pomocným relé komunikuje s drivery a slouží pro aktivaci joysticků. Obě polohovací zařízení jsou osazeny koncovými indukčními spínači připojenými přes relé, které v případě sepnutí vyšlou signál do příslušných driverů, a ty zamezí dalšímu pohybu daných krokových motorů v příslušném směru.

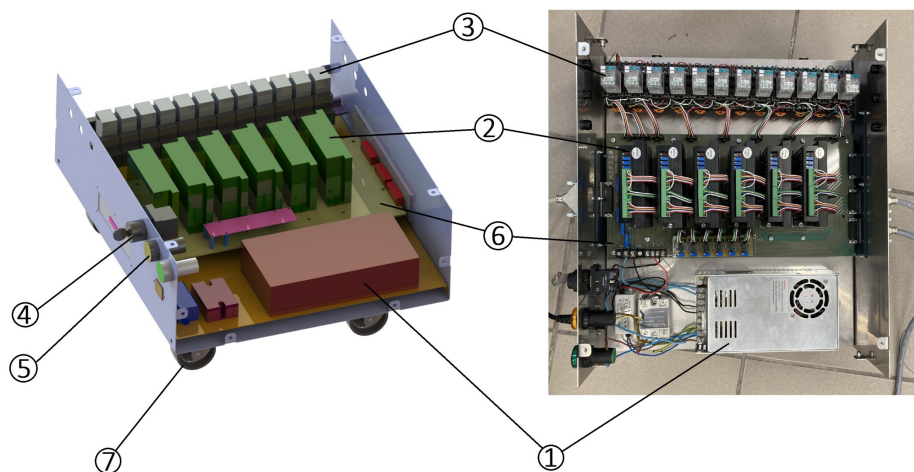


Obrázek 4.14: Blokové schéma

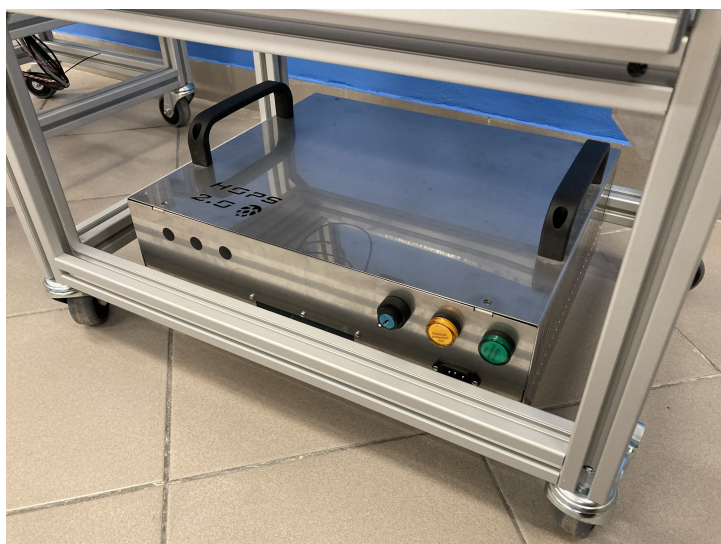
4.5.1 Skříň pro elektroniku

Na obrázku 4.15 je znázorněn model sestavy skříně pro elektroniku s příslušným označením součástí. Skříň pro elektroniku je napájena napětím 230 V z elektrické sítě. Napájení je nejdříve vedeno do skříně pro elektroniku, kde je převedena vstupní hodnota napětí na hodnotu 24 V

spínacím napájecím zdrojem (S350-24, MEAN WELL ENTERPRISES CO., LTD., Čína) (1). Spínaný napájecí zdroj dále rozvádí výstupní proud a napětí do indukčních koncových snímačů a autonomních digitálních driverů s podporou analogových vstupních signálů (DM805AI, Leadshine Technology, USA) (2). Tyto drivery obstarávají řízení motorizovaných os a jsou řízeny ve velocity módu (řízení rychlosti otáčení krokového motoru). Drivery jsou řízeny joysticky ovládacího tabla a také výstupní informací z indukčních koncových spínačů polohovacích zařízení. Pro zastavení pohybu krokových motorů v daném směru jsou koncové indukční spínače připojeny přes relé (782L/24VDC, ELKO EP, s.r.o, Česká republika) (3), které zastaví chod krokových motorů v případě sepnutí. Ve stěně skříně pro elektroniku jsou zabudovány ovládací prvky pro zabezpečení. Jedná se o ovladač s klíčem (4) a dvojici signálních LED diod (5) signalizujících přítomnost napětí 230 V a 24 V, pro možnost odpojení zdroje ze sítě. Pro redukci kabeláže a zpřehlednění zapojení byla vyhotovena čtyřvrstvá deska plošných spojů (6), která propojuje všechny elektronické komponenty ve skříně pro elektroniku a také usnadňuje jejich propojení s elektronickými prvky tabla a polohovacích zařízení. Skříň pro elektroniku je vybavena pojezdovými kolečky (7) pro snadnou mobilitu. Vnější rozměry skříně jsou dimenzovány tak, aby bylo možné skříň umístit pod Mobilní polohovací stůl (viz. obrázek 4.16). Výkresová dokumentace, model sestavy skříně, podrobné schéma elektronického zapojení a desky plošných spojů jsou znázorněny v příloze 4.



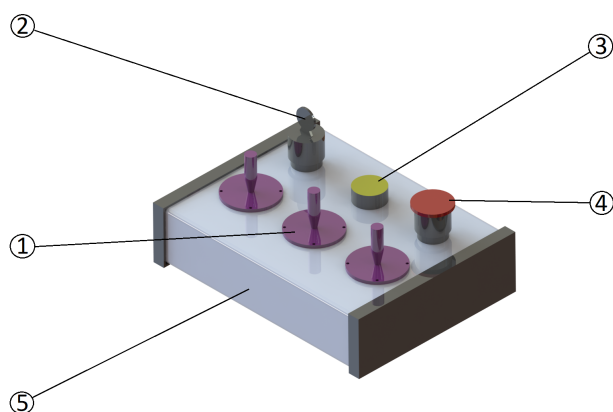
Obrázek 4.15: Skříň pro elektronickou výbavu



Obrázek 4.16: Způsob uskladnění skříně pro elektroniku pod Mobilní polohovací stůl

4.5.2 Ovládací tablo

Praktické využití obou polohacích zařízení vyžaduje ovládat jejich polohování přímo od stanoviště operátora. Zároveň by měla být umožněna obsluha jen jednou osobou, která na monitoru bude moci přímo sledovat pozici záběru včetně zaostření obrazu optického zdroje. Z těchto důvodů bylo pro obě polohovací zařízení navrženo jediné ovládací tablo, které je propojovacím kabelem připojeno ke skříně pro elektroniku. Obsluha může polohovat oběma polohovacími zařízeními zároveň, což značně automatizuje přípravu experimentu. Model sestavy ovládacího tabla je znázorněn na obrázku 4.17. Ovládací tablo je vybaveno trojicí analogových joysticků (1), ovlá-



Obrázek 4.17: Model sestavy ovládacího tabla

dačem na klíč pro jejich aktivaci (2), signální LED diodou (3) a tlačítkem nouzového zastavení (4). První samostatný joystick je určen k ovládání obou os rotace MPZ, zbylé dva joysticky

ovládají lineární posuvy v HOPS 2.0 a osu rotace pro naklápění křížového stolu. Aktivace těchto joysticků pomocí ovladače na klíč je zde proto, aby nedošlo k nechtěnému pohnutí s již ustavenou kamerou. Všechny výše vyjmenované komponenty ovládacího tabla jsou zabudovány v krabičce z hliníkové slitiny (5) o rozměrech $220 \times 165 \times 52$ mm. Velikost krabičky byla zvolena s ohledem velikost vnitřních komponent včetně vnitřní kabeláže. Dále byl kladen důraz na ergonomii, jelikož je výhodné mít možnost vzít si ovládací tablo do rukou, případně mít zajištěnou jeho stabilitu, když je používáno na stole nebo jen odloženo. Skříň pro elektroniku je k ovládacímu tablu připojena pomocí 25-žilového kabelu, který je oboustraně zakončen konektory D-SUB25F. Model sestavy ovládacího tabla je znázorněn v příloze 4.

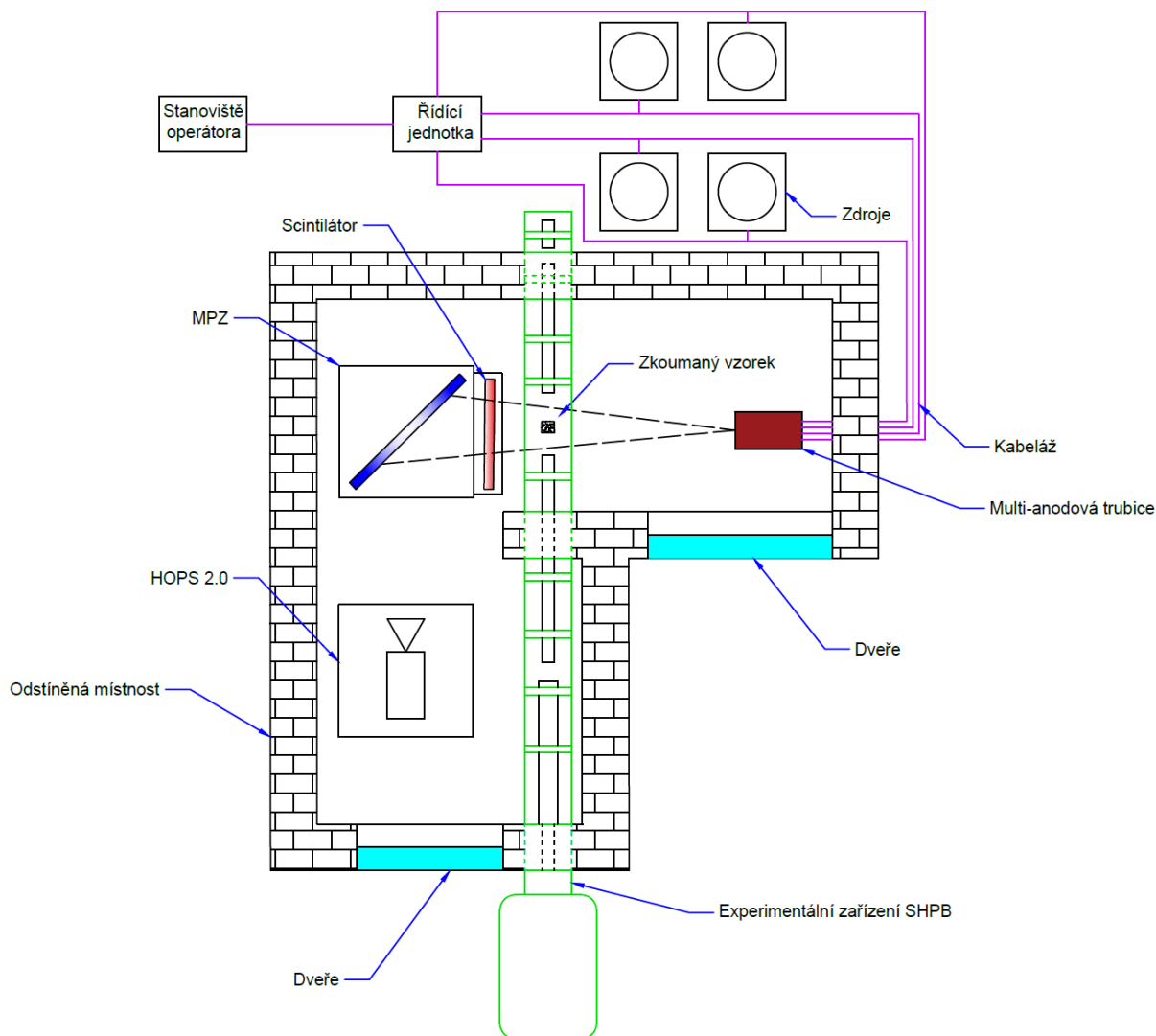
Kapitola 5

Pilotní test systému

Původním záměrem v rámci této práce byl ověřující experiment jen v rámci metody DIC s více zdroji, kde by se ověřila jen funkčnost zařízení pro použití při experimentech se dvěma kamerami. Ani v plánu a zadání této práce se neuvažovalo s ověřujícím experimentem pro měřící metodu FXR [14], který by ověřil všechny vlastnosti a prokázal přednosti vyhotovených zařízení, protože se zprovozněním experimentální sestavy FXR bylo počítáno až v období po dokončení této práce. Koncem roku 2020 se však ukázalo, že bude časově proveditelné ověřit funkčnost vyhotovených zařízení experimentální metodou FXR, jelikož se dařila postupná finalizace této experimentální sestavy. Tato skutečnost se ukázala být podstatnou výhodou, protože by bylo možné otestovat všechny vlastnosti zařízení, včetně těch cílených také pro experimentální metodu DIC s více zdroji. Po konzultacích s vedoucími této práce bylo učiněno rozhodnutí, že z hlediska využití zařízení na pracovišti bude mnohem přínosnější ověřující experiment metodou FXR.

Flash X-ray radiografie (FXR) se stala důležitou diagnostickou metodou ve výzkumu extrémně rychlých dějů (terminální balistika, detonace atd.). V terminální balistice je zaznamenání průniku projektilu do cíle v reálném čase velmi důležité pro analýzu balistické účinnosti materiálů, ze kterých je cíl vyroben. Během těchto událostí nejsou užitečné konvenční optické diagnostické metody založené na viditelném světle pro zobrazování projektilů uvnitř cílových materiálů [15]. FXR je velmi unikátní metodou a disponuje jí celosvětově jen pár laboratoří.

Na obrázku 5.1 je znázorněno schéma celého systému včetně současné integrace experimentálního zařízení SHPB popsaného v kapitole 2. Toto FXR provedení disponuje čtyřmi anodami v kruhovém uskupení, které postupně vyzářují rentgenové záření v záblescích (o délce 20 ns), a to s odstupem v řádu mikrosekund. Tyto paprsky poté dopadají na scintilační vrstvu, která převádí rentgenové záření do viditelné oblasti spektra na své výstupní straně. K zachycení a

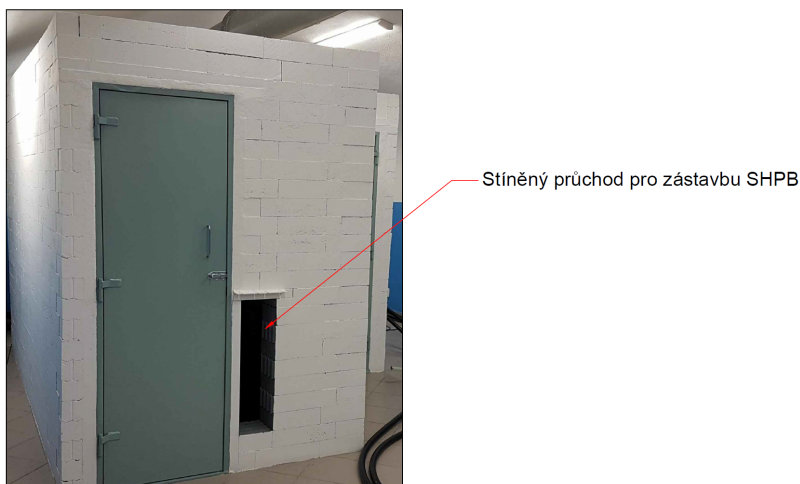


Obrázek 5.1: Schéma komponent sestavy FXR včetně integrovaného experimentálního zařízení SHPB

uložení snímků se používá zpravidla rychlokamera. Na obrázku 5.2 jsou znázorněny hlavní komponenty tohoto systému používané v laboratoři ústavu. Jmenovitě se jedná o multi-anodovou trubici, pulzní zdroj a řídicí jednotku. Multi-anodová trubice je zdrojem rentgenového záření, proto je z důvodu zabezpečení umístěna v odstíněné místnosti, která je ukázána na obrázku 5.3. Tuto trubici napájí výkonný pulzní zdroj, který funguje na principu kondenzátoru a generuje vysokonapěťové pulzy. Operátor ze svého stanoviště ovládá počítačem řídicí jednotku, která dále komunikuje se zdroji a multi-anodovou trubicí [16]. Pro ověření funkčnosti celého systému včetně vyhotovených polohovacích zařízení byly provedeny dva pilotní experimenty.



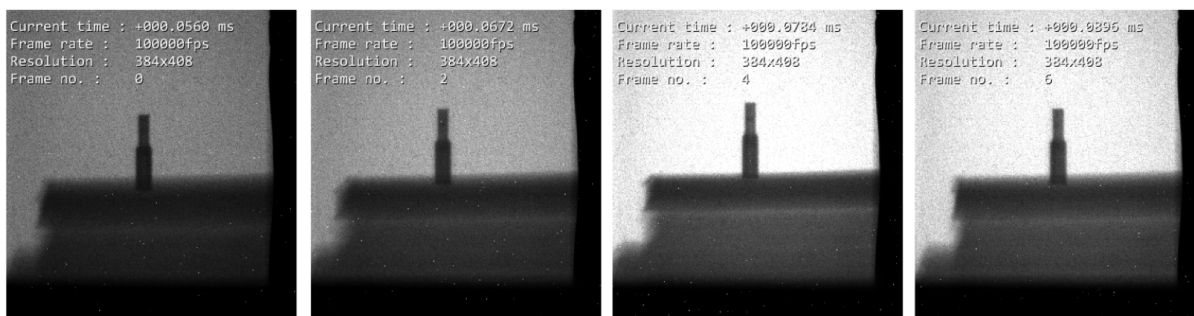
Obrázek 5.2: Zleva: multi-anodová trubice, kondenzátorové zdroje, skříň s řídicí jednotkou



Obrázek 5.3: Betonový bunkr pro odstínění rentgenového záření

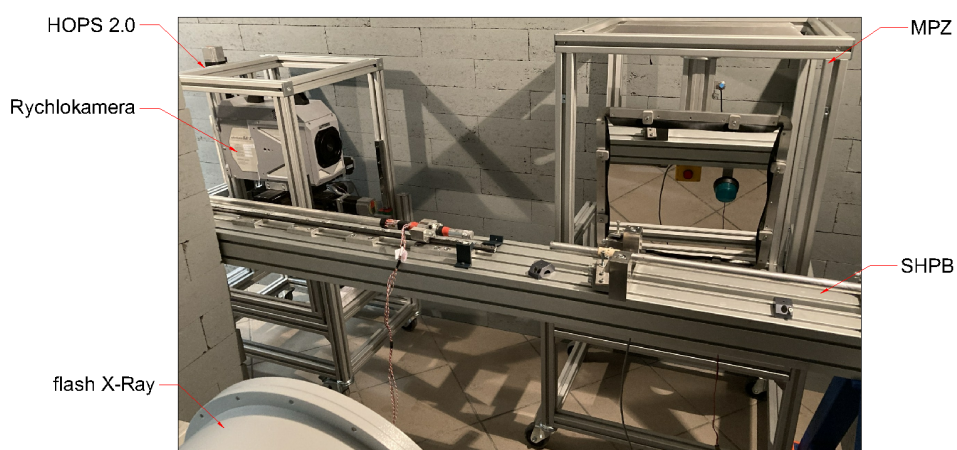
5.1 Ověřovací experiment flash X-ray

Prvním typem ověřovacího experimentu bylo ozařování válcového vzorku o průměru 10 mm vyrobeného z chrom-vanadiové oceli. Rozbíhavý svazek paprsků rentgenového záření z multi-anodové trubice prochází vzorkem a přes scintilátor, kde je převeden do viditelné oblasti spektra. Následně byl obrazový výstup z výstupní strany scintilátoru odražen optickým zrcadlem do rychlokamery a zaznamenán. Na obrázku 5.4 jsou vyobrazeny zaznamenané snímky rychlokamerou. Vybrány byly snímky, kde je zřejmý větší jas vlivem záblesku scintilátoru na jeho výstupní straně. K tomuto jevu došlo čtyřikrát, s odstupem přibližně 10 mikrosekund, což je požadovaný výsledek. Prvním důvodem rozdílného jasu je pomalé vybíjení scintilátoru, na kterém zůstává zbytkový obraz z předchozího snímku (dochází k postupné saturaci pozadí). Druhým důvodem je, že nepřesnost triggeru pulzů blíží se 1 mikrosekundě může způsobit nevhodnou expozici snímku. Tento experiment byl proveden při použití rychlokamery s nastavením na záznam při 100000 fps



Obrázek 5.4: Vybrané zaznamenané snímky s odstupem záznamu přibližně 10 mikrosekund (počet snímků za sekundu). Pod napětím 240 kV, proudem 10 kA a expozicí 1/6e6 s. Díky integraci polohovacích zařízení bylo možné zachytit rychlokamerou při 100000fps děje trvající v řádu mikrosekund při 159 ns expozici.

Tento setup je vhodný pro využití experimentálního zařízení SHPB, jehož zástavba do betonového bunkru je v současné době prováděna. Na obrázku 5.5 je ukázána zástavba SHPB včetně rozmístěných zařízení HOPS 2.0 a MPZ uvnitř betonového bunkru FXR.

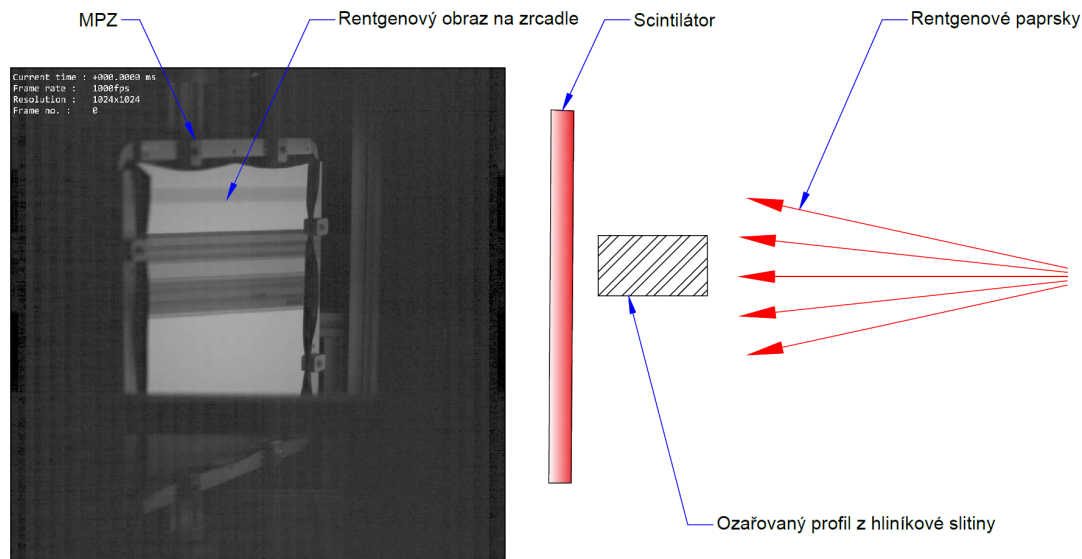


Obrázek 5.5: HOPS 2.0 a MPZ v betonovém bunkru FXR včetně zástavby SHPB

5.2 Ověřovací experiment při kontinuálním ozařování výkonnou rentgenkou

Druhý typ ověřovací experiment byl proveden s využitím výkonné rentgenky pro pomalejší kontinuální zobrazování s vyšším rozlišením obrazu. Ozařován byl profil z hliníkové slitiny o průřezu 80×160 mm. Tento experiment byl proveden při použití rychlokamery s nastavením na záznam při 1000 fps. Rentgenka byla nastavena na napětí 225 kV a proud 4 mA. Výstupem obrazu je kromě ověření funkčnosti polohovacích zařízení také zjištění, jak kvalitní bude obrazový výstup při kontinuálním ozařování výkonnou rentgenkou, který dále závisí na nastavených fps rychlokamery, výkonu rentgenky atd.

Pro tento setup se v současné době staví k SHPB zatěžovací zařízení využívající lineární motory. Toto zařízení umožní velmi přesně řízené zatěžování rychlostí do 8 m/s, což je srovnatelné s rychlostí zatěžování padostrojem. Aplikace tohoto typu experimentu je vhodná pro pomalejší dynamické děje, které lze uplatnit například v oblastech biomechaniky pádů (např. předpoklad zranění na figurínách), rázové testy ochranných pomůcek pro cyklisty (např. rázová zkouška cyklistické helmy) atd. Na obrázku 5.6 je ukázan snímek při kontinuálním ozařování hliníkového profilu včetně popisového schématu.



Obrázek 5.6: Osvícení zrcadla scintilátorem při kontinuálním ozařování hliníkového profilu

Kapitola 6

Závěr

V této práci byla navržena a realizována zařízení, která umožňují provádět experimenty pomocí měřicí metody FXR a automatizují přípravy experimentů pomocí měřicí metody DIC s více zdroji. Dále byla zajištěna jejich kompatibilita se zařízením HOPS první generace, které bylo součástí bakalářské práce. Funkčnost a spolehlivost všech zařízení byla náležitě ověřena pilotním experimentem pomocí měřicí metody FXR a experimentem se silnou rentgenkou.

Vyhotovená zařízení jsou zařízení MPZ, které zajišťuje polohování optickým zrcadlem a HOPS 2.0, které slouží k polohování optickým zdrojem. Tato zařízení jsou plně motorizována a dálkově ovladatelná od stanoviště operátora během provádění experimentů, přičemž jejich dálková ovladatelnost je zajištěna pomocí ovládacího tabla a externí skříně pro elektroniku.

Přílohy obsahují kompletní výkresovou dokumentaci, modelové sestavy všech celků a schéma elektroického zapojení včetně dokumentace integrované desky plošných spojů.

Důvod pro odklon od ověřujícího experimentu pomocí měřicí metody DIC s více zdroji byl, že se v průběhu řešení této práce podařilo Ústavu mechaniky a materiálů na Fakultě dopravní dokončit sestavu aparatury pro měření pomocí experimentální metody FXR. Díky této skutečnosti bylo možné ověřit všechny klíčové vlastnosti navrhovaných zařízení včetně ověření proveditelnosti experimentů pomocí měřicí metody FXR, pro jejíž funkčnost jsou realizovaná zařízení nezbytná. Jelikož bylo původním záměrem této práce ověřit jen některé vlastnosti těchto zařízení při nasazení v experimentální metodě DIC s více zdroji, bylo tak dosaženo výsledků přesahujících cíle této práce.

Ústav mechaniky a materiálů na Fakultě dopravní do budoucna nadále plánuje realizovat pokročilější aplikace metody DIC. Například pro experimenty se silnou rentgenkou je možné provést DIC na radiografických snímcích, kterých je pro tuto aplikaci dostatek. Tyto aplikace bude

možné provést díky realizovaným polohovacím zařízením, jejichž funkčnost byla ověřena pilotními experimenty.

Vyhotovená polohovací zařízení jsou aktuálně již nasazována na pokročilá měření 3D tištěných struktur, kovových pěn a dalších pokročilých materiálů využitelných v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu. Rovněž jsou tato zařízení součástí unikátní laboratoře, která je v České republice jediná svého druhu.

Literatura

- [1] M. Adorna, P. Zlámál, T. Fíla, J. Falta, M. Felten, M. Fries, A. Jung .: *Testing of Hybrid Nickel-Polyurethane Foams at High Strain-Rates using Hopkinson Bar and Digital Image Correlation*, 2018, vol. 18, s. 72–76
- [2] Bing Pan, Dafang Wu, Yong Xia: An active imaging digital image correlation method for deformation measurement insensitive to ambient light, *Optics and Laser Technology*, 2012, vol. 18, s. 204–209
- [3] I.V. Lavrinovich, N.V. Zharova, V.K. Petin, N.A. Ratakhin, V.F. Fedushchak, S.V. Shlyakhtun, and A.A. Erfort. A compact pulsed x-ray source for high-speed radiography. *Instruments and Experimental Techniques*, 2013, 56(3), 329-334
- [4] V.V. Nagarkar, S.V. Tipnis, V. Gaysinskiy, S.R. Miller, and I. Shestakova. High-speed digital radiography using structured csi screens. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2004, vol. 213, 476-480
- [5] Lukasz Farbaniec, David J. Chapman, Jack R.W. Patten, Liam C. Smith, James D. Hogan, Alexander Rack, and Daniel E. Eakins. In-situ visualisation of dynamic fracture and fragmentation of an l-type ordinary chondrite by combined synchrotron x-ray radiography and microtomography. *Icarus*, 2021, vol. 359:114346
- [6] SHARMA, S., CHAVAN, V.M., AGRAVAL, R.G., PATEL, R.J., KAPOOR, R., CHAKRAVARTTY, J.K.: *Split-Hopkinson Pressure Bar: An Experimental Technique for High Strain Rate Tests* [online]. 2011, [cit. dne 20.11.2020].
- [7] T. Fíla, P. Koudelka, J. Falta, J. Šleichrt, M. Adorna, P. Zlámál, M. Neuhauserová, A. Mauko, J. Valach, and O. Jiroušek. Impact behavior of additively manufactured stainless steel auxetic structures at elevated and reduced temperatures. *Advanced Engineering Materials*, 23(1), 2021

- [8] Tomáš Fíla, Petr Koudelka, Jan Falta, Petr Zlámal, Václav Rada, Marcel Adorna, Štefan Bronder, and Ondřej Jiroušek. Dynamic impact testing of cellular solids and lattice structures: Application of two-sided direct impact hopkinson bar. *International Journal of Impact Engineering*, 148:103767, 2021.
- [9] Chu TC, Ranson WF, Sutton MA. Applications of digital image correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 1985, vol. 25, 232–244
- [10] Sutton MA, McNeill SR, Jang J, Babai M. Effects of subpixel image restoration on digital correlation error estimates. *Optical Engineering*, 1988, 27(10):870–877
- [11] M.A. Sutton, J.H. Yan, V. Tiwari, H.W. Schreier, J.J. Orteu. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, vol. 46, 746-757
- [12] E Verhulp, B.van Rietbergen, R Huiskes, A three-dimensional digital image correlation technique for strain measurements in microstructures. *Journal of Biomechanics*, 2004, vol. 37, 1313-1320
- [13] Hudák, Úprava SHPB pro pokročilé měření materiálů v dopravě. Praha, 2018. Bakalářská práce. Fakulta dopravní ČVUT, Ústav mechaniky a materiálů. Vedoucí bakalářské práce Daniel Kytýř, Tomáš Fíla.
- [14] Norbert Faderl and Marvin Becker: High-speed 300keV flash x-ray cinematography for investigations of the ballistic impact behavior of target materials and structures. *Anomaly Detection and Imaging with X-Rays (ADIX) IV*, 2019, vol. 10999
- [15] B. Venkata Ramudu, C. Jayarami Reddy, V. Madhu: *Flash X-ray radiography technique to study the high velocity impact of soft projectile on E-glass/epoxy composite material*, Defence Technology, 2019, vol. 15, iss. 2, s. 216–226
- [16] Arne Mattsson: *New developments in flash radiography*, 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, 2017, vol. 6279, doi: 10.1117/12.725167