

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA DOPRAVNÍ



ÚPRAVA SHPB PRO POKROČILÉ MĚŘENÍ  
MATERIÁLŮ V DOPRAVĚ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Michael Hudák

Praha, 2018



**K618** ..... **Ústav mechaniky a materiálů**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Michael Hudák**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – DOS – Dopravní systémy a technika**

Název tématu (česky): **Úprava SHPB pro pokročilé měření materiálů v dopravě**

Název tématu (anglicky): Upgrade of SHPB for Advanced Measurements in Transportation

### **Zásady pro vypracování**

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

- Dělená Hopkinsonova tyč (SHPB) je experimentální zařízení pro zjišťování dynamických mechanických vlastností materiálů za vysokých hodnot rychlosti deformace.
- Cílem práce je úprava existujícího zařízení SHPB pro provádění pokročilých experimentů včetně synchronizovaného záznamu zkoušek pomocí tenzometrických snímačů a rychloběžné kamery. V rámci práce tak budou modifikovány např. tyto celky: stínění měřicích vodičů, krytování zařízení, adaptér pro montáž rychlokamery, prvky pro opakované tlumení nárazů s vysokou energií a adaptéry pro nasvícení vzorku pro snímání rychloběžnou kamerou.
- Výstupem práce bude soubor dílčích modifikací existujícího zařízení včetně technické dokumentace pro provádění pokročilých experimentů metodou SHPB. Funkčnost jednotlivých řešení bude ověřena experimentálními zkouškami na vzorku materiálu vhodného pro absorpci energie nárazu v konstrukcích dopravních prostředků.



Rozsah grafických prací: nebyl stanoven


Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)


Seznam odborné literatury: Shukla A. et al., Dynamic Failure of Materials and Structures, Springer, 2010, ISBN 978-1-4419-0445-4  
Hoffmann K., An Introduction to Measurements using Strain Gages, HBM, 2012  
Kunwoo L., Principles of CAD/CAM/CAE, Pearson, 1999, ISBN, 978-0201380361


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Daniel Kytýř, PhD.**  
**Ing. Tomáš Fíla**

Datum zadání bakalářské práce: **20. března 2017**  
(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: **27. srpna 2018**  
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.

  
Michael Hudák  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 20. března 2017

## Poděkování

Nejprve bych chtěl poděkovat vedoucím práce Ing. Tomáši Fílovi a doc. Ing. Danielu Kytýřovi, Ph.D. za veškerý čas, který mi věnovali při konzultacích, za cenné rady a vstřícnost. Dále bych rád poděkoval Ing. Petru Zlámalovi Ph.D. za veškeré připomínky a rady v průběhu řešení bakalářské práce. Také děkuji Ing. Janu Faltovi za dohled při řešení elektronického zapojení, které tvoří nedílnou součást této práce.

Práce vznikla za podpory grantu Grantové agentury České Republiky číslo 15-15480S, grantu Studentské grantové soutěže ČVUT č. /SGS17/148/OHK2/2T/16/, a projektu RPMT ČVUT 1051758F020 IP2017.

Mé poděkování patří také mé rodině a přátelům, kteří mě neustále podporovali po celou dobu mého bakalářského studia.

## 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 (autorských zákonů).

Praha, 27. srpna 2018

.....

Michael Hudák

ÚPRAVA SHPB PRO POKROČILÉ MĚŘENÍ  
MATERIÁLŮ V DOPRAVĚ

MICHAEL HUDÁK

ČVUT v Praze, Fakulta dopravní

Praha, 2018

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce „Úprava SHPB pro pokročilé měřené materiálů v dopravě“ realizuje dílčí prvky Dělené Hopkinsonovy tyče (z ang. Split Hopkinson Pressure Bar - SHPB) a jejich modifikaci. Účelem těchto dílčích prvků je zjednodušení obsluhy zařízení, částečné zvýšení zabezpečení a zlepšení spolehlivosti. Praktickou částí je také kompletně vypracovaná technická dokumentace, která je nezbytným podkladem pro výrobu realizovaných řešení. Funkčnost jednotlivých navržených prvků je prokázána provedenými experimenty se vzorky auxetických struktur.

## **Klíčová slova**

SHPB, 3D CAD modelování, polohování optiky

UPGRADE OF SHPB FOR ADVANCED MEASUREMENTS  
IN TRANSPORTATION

MICHAEL HUDÁK

CTU in Prague, Faculty of Transportation Sciences  
Prague, 2018

**Abstract**

This Bachelor thesis "Upgrade of SHPB for Advanced Measurements in Transportation" realizes sub-elements of Split-Hopkinson pressure bar (SHPB) and its modifications. These elements are first created as models in the Autodesk Inventor software environment, followed by the relevant technical documentation and finally the elements are manufactured and applied to the SHPB. The purpose of these sub-elements is to simplify the operation and to partially increase safety. The proper function of designed parts is demonstrated using performed experiments with samples of the auxetic structure.

**Keywords**

SHPB, 3D CAD modeling, optical positioning

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
1.1	Motivace . . . . .	10
1.2	Cíle práce . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Výchozí stav</b>	<b>11</b>
2.1	Stručný popis funkčních částí Dělené Hopkinsonovy tyče . . . . .	11
2.2	Nedostatky výchozího stavu . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Řešení</b>	<b>14</b>
3.1	Úvod . . . . .	14
3.2	Ochranné krytování prostoru vzorku . . . . .	14
3.3	Přípravek pro utěsnění odvětrávacích otvorů hlavně . . . . .	15
3.4	Silová kalibrace . . . . .	17
3.5	Modifikovaná pouzdra pro domky měřících tyčí . . . . .	19
3.6	Hybridní optický polohovací systém . . . . .	21
3.6.1	Úvod . . . . .	21
3.6.2	Vnější konstrukce . . . . .	23
3.6.3	Teleskopický portál s výsuvným stolcem . . . . .	25
3.6.4	Elektronická výbava . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Výsledky</b>	<b>32</b>
4.1	Ověření funkčnosti dílčích prvků SHPB . . . . .	32
4.2	Ověřovací experiment pro zařízení HOPS . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>36</b>
	<b>Literatura</b>	<b>37</b>





# Seznam obrázků

2.1	Schéma zařízení SHPB . . . . .	12
2.2	Fotografie zařízení SHPB . . . . .	12
3.1	Model ochranného krytu a realizovaný kryt . . . . .	15
3.2	Model krycího plechu profilu a realizovaný krycí plech . . . . .	15
3.3	Původní řešení utěsnění otvorů odvětrání . . . . .	16
3.4	Model přípravku pro utěsnění a realizovaný přípravek pro utěsnění . . . . .	16
3.5	Schéma a pojmenování funkčních částí kalibrace . . . . .	17
3.6	Model zatěžovací části sestavy . . . . .	18
3.7	Model zatěžovací měřící sestavy . . . . .	18
3.8	Model opěrné části sestavy . . . . .	19
3.9	Ložiskový domeček TJUM-05 . . . . .	20
3.10	Model sestavy pouzdra . . . . .	20
3.11	Model sestavy rozebraného pouzdra . . . . .	21
3.12	Model sestavy HOPS . . . . .	22
3.13	Porovnání nulového a plného výsuvu realizovaného zařízení HOPS . . . . .	23
3.14	Model sestavy vnější konstrukce . . . . .	24
3.15	Model sestavy kuličkového šroubu . . . . .	25
3.16	Model porovnání teleskopického výsuvu . . . . .	25
3.17	Detail realizovaného křížového stolku . . . . .	26
3.18	Model spodní části teleskopického výsuvu . . . . .	27
3.19	Model vrchní části teleskopického výsuvu . . . . .	27
3.20	Model lineárního modulu s krokovým motorem . . . . .	28
3.21	Skříň pro elektronickou výbavu . . . . .	29
3.22	Ovládací tablo . . . . .	30
3.23	Blokové schéma elektrického zapojení . . . . .	31

4.1	Model auxetické struktury a fotografie vzorku . . . . .	33
4.2	Srovnání stativu se zařízením HOPS . . . . .	34
4.3	Transmisní tyč se vzorkem testované auxetické struktury . . . . .	34
4.4	Průběh deformace vzorku typu <i>2D re-entrant</i> . . . . .	35
4.5	Diagramy získané ze zpracování naměřených dat . . . . .	35
6.1	Krycí plech profilu . . . . .	39
6.2	Ochranný kryt . . . . .	40
6.3	Přípravek pro utěsnění . . . . .	41
6.4	Teleskopický portál s výsuvným stolcem - HOPS . . . . .	42
6.5	Vnější konstrukce zařízení - HOPS . . . . .	43
6.6	Podrobné schéma elektronického zapojení - HOPS . . . . .	44

# Kapitola 1

## Úvod

Náplní této práce je realizace dílčích prvků Dělené Hopkinsonovy tyče (z ang. Split Hopkinson Pressure Bar - SHPB), přičemž jejich účelem je zlepšit obsluhu a funkčnost již využívané SHPB v Laboratoři dynamických dějů na Fakultě dopravní. Tyto prvky buďto nahrazují některá stávající řešení, případně umožňují realizaci nových funkcí. Tvorba těchto prvků byla realizována za pomoci parametrického, adaptivního 3D modeláře Autodesk Inventor. V tomto modeláři byly nejprve vyhotoveny modely jednodílných prvků, případně modely celých sestav u vícedílných prvků a nakonec příslušná technická dokumentace včetně technických výkresů, případně kusovníků. Zmíněné výkresy a kusovníky byly následně využity k výrobě zakázkových dílů. Nejprve byly realizovány prvky mající vliv přímo na bezpečnost při provedeném experimentu. Jednalo se zejména o kryt vzorku, který slouží zejména k zamezení rozptylu roztržitých úlomků deformovaného vzorku. Požadavkem na konstrukci krytu bylo také umožnění přímého pozorování vzorku. Dalším prvkem byl přípravek pro zrychlení nabití vzduchového děla, při jehož nasazení na hlavěň dojde k ucpání všech odvětrávacích otvorů hlavě a projektil lze nabít tlakem vzduchu. Pro kalibraci tenzometrických snímačů a ověření jejich správné funkce byla realizována sestava pro silovou kalibraci. Sestava umožní vložit kalibrační siloměr do soustavy tyčí SHPB a tím porovnat výstupy siloměru a tenzometrických snímačů. Dalším prvkem byla modifikace původních domků pro fixaci tyčí, které na rozdíl od původního řešení umožňují vyndání tyčí bez poškození tenzometrických snímačů, a které dále disponují funkcí komfortnějšího a přesnějšího ustavení tyčí. Poslední a nejvýznamnější částí celé práce je hybridní optický polohovací systém (HOPS), který slouží jako mobilní, polohovací, plně motorizovaný stativ určený pro optickou měřicí techniku, např. rychlokamery, digitální zrcadlovky, atd. Konstrukce byla navržena tak, aby mohla být použita nejen pro SHPB, ale i pro jiné experimentální zařízení v laboratoři. Realizace zařízení HOPS byla komplexní úloha. Obsahovala návrh nejen z hlediska konstrukčního, ale také

elektroniku a koncept řízení.

## 1.1 Motivace

Hlavním důvodem pro realizaci tohoto projektu byla nutnost navýšení bezpečnosti obsluhy, bezpečnosti měřících zařízení, zvýšení komfortu, zlepšení spolehlivosti měření a zkrácení doby vynaložené k obsluze zařízení SHPB. Další motivací byla také snaha o navržení plně motorizovaného polohovacího zařízení, které by bylo využito k upevnění běžně používaných optických měřících zařízení, včetně možnosti osvětlení zkoumaného vzorku a možnosti rychlého a přesného zaostření obrazu při obsluze pouze jednou osobou. Původně byl k SHPB používán konvenční stativ, což nebylo vhodné vzhledem k nepřesnému ustavení kamery a časové náročnosti nastavení sledované oblasti a zaostření. Také princip aretace stativové hlavy a vůle nastavení stativu nepřesnost ještě zvyšovaly. Tyto problémy měly příčinu hlavně ve způsobu polohování využívaného stativu. Jelikož je HOPS určen pro optické měření, která se na Ústavu mechaniky a materiálů Fakulty dopravní využívají u více experimentálních zařízení, (padostroj, zatěžovací stolice atd.) bylo také motivací jeho použití u těchto zkoušek a nikoliv pouze u zařízení SHPB. Potřeba mobility a adaptace na různá měřící zařízení se významně projevila v konstrukci HOPS.

## 1.2 Cíle práce

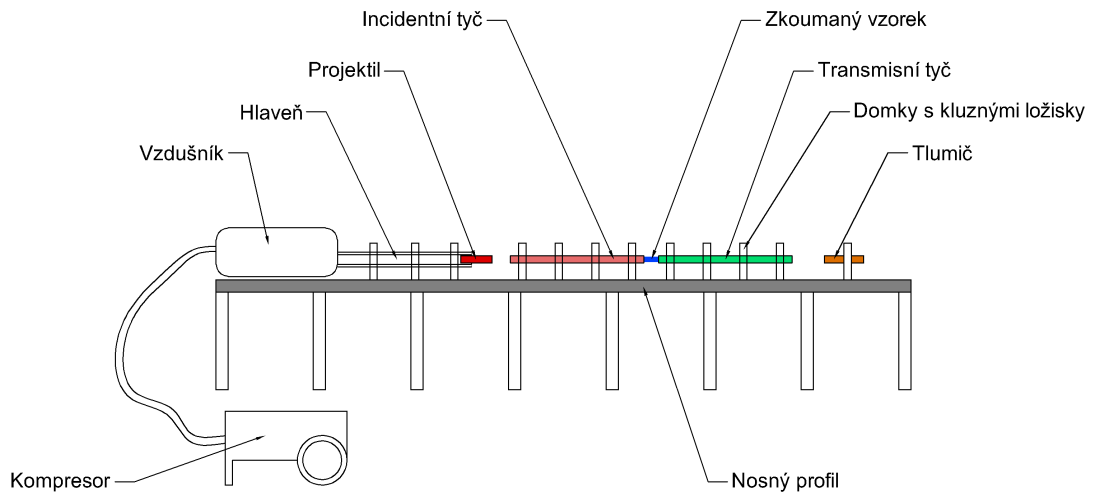
Hlavním cílem této bakalářské práce je vyhotovení dílčích prvků pro zařízení SHPB, které nahrazují stávající řešení, případně doplňují zařízení o nové funkce. Dalším důležitým cílem je ekonomická výhodnost výroby daných řešení dílčích prvků. U některých součástí je nezbytné, aby byly vyrobeny s přesnou tolerancí, což se velmi projevuje na ceně výroby. Dále také záleží na složitosti součástí, což se rovněž na ceně výroby výrazně projevuje. Účelem jednotlivých prvků je usnadňovat měření z hlediska zjednodušení přípravy experimentů, celkové zlepšení intuitivnosti obsluhy zařízení, zlepšení spolehlivosti měření, navýšení bezpečnosti během celého procesu používání zařízení SHPB a také zkrácení časové doby, během které je zařízení SHPB obsluhováno. Pro zařízení HOPS je cílem také jeho univerzálnost pro další experimentální zařízení, a tedy nejen jeho využití pro SHPB. Cílem je, aby se všechny tyto úpravy pozitivním způsobem projevily na procesu kalibrace SHPB, procesu provedení experimentu a průběhu měření.

## Kapitola 2

# Výchozí stav

### 2.1 Stručný popis funkčních částí Dělené Hopkinsonovy tyče

Dělená Hopkinsonova tyč funguje na principu šíření jednorozměrné deformační vlny. Základními komponentami zařízení SHPB využívaným v laboratoři Ústavu mechaniky a materiálů jsou kompresor, vzdušník, hlaveň, projektil, incidentní tyč a transmisní tyč. Jedná se o běžně užívaný koncept. Projektil je umístěn v hlavni na ústí vzdušníku. Incidentní a transmisní tyč je vyrobena ze stejného materiálu a mají stejný průměr jako projektil. Během celého průběhu experimentu by nemělo u těchto komponent dojít k překročení meze kluzu. Testovaný vzorek je vložen mezi incidentní a transmisní tyč. Při otevření ventilu vzdušníku je projektil poháněn tlakem vzduchu k incidentní tyči. Při nárazu projektilu do incidentní tyče vzniká kompresní vlna, která se šíří incidentní tyčí směrem k vzorku. Při kontaktu se vzorkem způsobí šířená vlna jeho deformaci. Část vlny pokračuje vzorkem do transmisní tyče (přenosovým pulzem) a část je odražena zpět do incidentní tyče (odraženým pulzem). Všechny šířené vlny jsou zaznamenány tenzometry, kterými jsou obě tyče osazeny. Tenzometry na každé z tyčí jsou zapojeny v polovičním Wheatsonově můstku pro odstranění vlivu ohybu. Získané hodnoty deformací vzniklých v incidentní a transmisní tyči jsou použity k výpočtu závislosti deformace na přetvoření vzorku [1]. Měřicí tyče jsou ustaveny na rovnoměrně rozmístěných kluzných ložiscích. Na obrázku 2.1 je znázorněno schéma funkčních částí zařízení SHPB. a na obrázku 2.2 je fotografie zařízení SHPB sestaveného a využívaného Ústavem mechaniky a materiálů.



Obrázek 2.1: Schéma zařízení SHPB s popisem mechanických částí



Obrázek 2.2: Zařízení SHPB sestavené a využívané Ústavem mechaniky a materiálů

## 2.2 Nedostatky výchozího stavu

Zařízení SHPB zkonstruované a využívané Ústavem mechaniky a materiálů Fakulty dopravní mělo ve svém výchozím stavu několik nedostatků, které měly vliv na provádění experimentů. Prvním nedostatkem bylo nedostatečné zabezpečení měřicí techniky a obsluhy před úlomky deformovaného vzorku během provedení experimentu. Další problém způsobovalo časově náročné nabíjení projektilu, které vyžadovalo utěsnění odvětrávacích otvorů hlavě. Ve výchozím stavu zařízení SHPB nedisponovalo možností silové kalibrace, která je nezbytná pro zaručení správnosti měřených dat na tenzometrických snímačích.

Kvůli způsobu provedení pouzder pro ložiskové domečky, které ustavují incidentní a transmisní

tyč, bylo možné měřícími tyčemi polohovat pouze ve směru jejich společné osy, což mělo negativní dopad na časovou náročnost ustavení. Toto provedení pouzder pro ložiskové domečky navíc neumožňovalo použít měřící tyče s jiným průměrem, a také vyžadovalo vysunutí tyčí při jejich výměně, což způsobovalo zničení aplikovaných tenzometrických snímačů.

Největším nedostatkem pro měření bylo využívání běžného stativu pro optické zařízení. To způsobovalo řadu problémů, hlavně časově náročné a pracné zaostření optické soustavy, nedostatečnou stabilitu, a nutnost přípravy měření ve více osobách.



# Kapitola 3

## Řešení

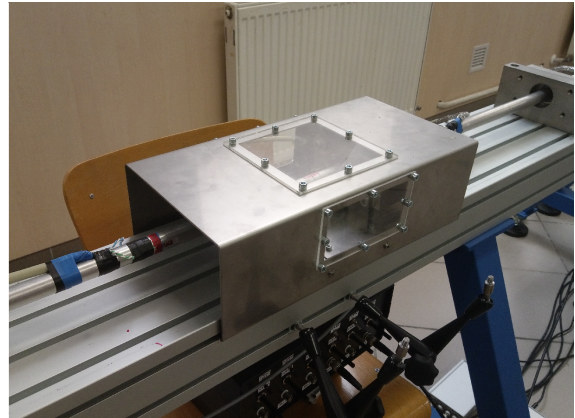
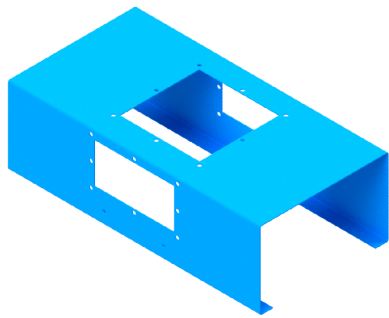
### 3.1 Úvod

V této kapitole jsou postupně představeny všechny dílčí prvky pro úpravu SHPB, které byly v rámci této práce realizovány. Je zde uveden technický popis nového řešení a doplněn o obrázky a schémata určené pro lepší pochopení textu. Kompletní technická dokumentace navrženého a realizovaného řešení i s příslušnými modely prvků a sestav jsou součástí přílohy bakalářské práce.

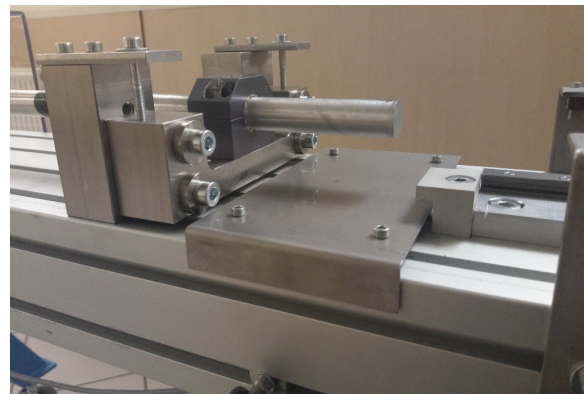
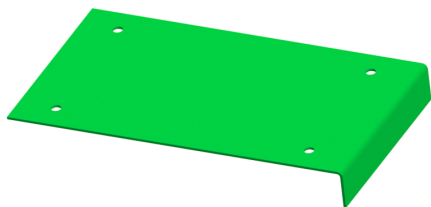
### 3.2 Ochranné krytování prostoru vzorku

Stávající zařízení SHPB nezajišťovalo ochranu měřících přístrojů před poškozením, rovněž také obsluha měřící techniky nebyla chráněna před případným úrazem způsobeným úlomky vzorku a rovněž byl profil zařízení SHPB těmito úlomky v průběhu experimentu znečišťován.

Účelem krytu vzorku je zamezit úniku možných úlomků deformovaného vzorku do okolí v průběhu experimentu a zabezpečit tak případná optická měřící zařízení před případným poškozením a poraněním obsluhy. Kryt vzorku je umístěn mezi incidentní a transmisní tyčí v prostoru vzorku (viz. Obrázek 3.1). Vybaven je průzory z plexiskla pro pozorování vzorku během experimentu. V případě poškození plexisklových průzorů je možná jejich snadná výměna. Navržen je tak, aby lícovál do drážek profilu, které slouží jako směrové vedení. Díky tomu lze krycí plech snadno odsunout v případě, že je vyžadována manipulace se vzorkem. Součástí krytu vzorku je i krycí plech profilu, který je umístěn na nosný hliníkový rám v místě pod vzorkem a zabraňuje propadávání nečistot nebo zderformovaného vzorku do drážek profilu. Krycí plech profilu je umístěn pod zkoumaným vzorkem (viz. Obrázek 3.2). Výkresová dokumentace ochranného krytování prostoru vzorku včetně modelů viz. elektronická příloha 1.



Obrázek 3.1: Model ochranného krytu (vlevo), realizovaný ochranný kryt umístěný v zařízení SHPB (vpravo)



Obrázek 3.2: Model krycího plechu profilu (vlevo), realizovaný krycí plech profilu umístěný v zařízení SHPB (vpravo)

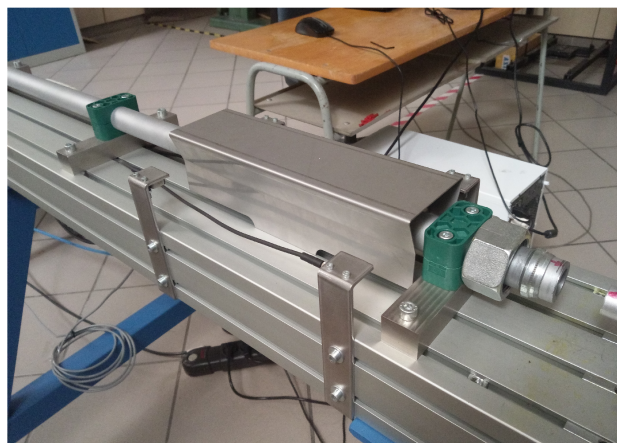
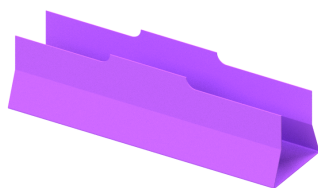
### 3.3 Přípravek pro utěsnění odvětrávacích otvorů hlavně

V původním řešení zařízení SHPB bylo nabíjení projektilu časově náročné. Nabíjení projektilu bylo prováděno nejprve utěsněním otvorů hlavně pro odvětrání, každého zvlášť pomocí těsnících prvků. (viz. Obrázek 3.3) Následně byla na ústí hlavně našroubována převlečná matice hadicového systému stlačeného vzduchu. Otevřením odpalovacího ventilu v hlavni došlo k šíření přetlaku systémem opačným směru než při běžném provozu a k nabití projektilu do hlavně. Odvětrávací otvory slouží k zajištění stability projektilu při výstřelu a jako průzory pro optické brány k měření rychlosti projektilu.



Obrázek 3.3: Původní řešení utěsnění otvorů pro odvětrání hlavně

Nový přípravek pro utěsnění odvětrávacích otvorů hlavně zcela utěsní všechny odvětrávací otvory ústí hlavně rychleji, než tomu bylo za pomoci těsnících prvků. V místech plechu, kde dochází k přímému kontaktu s odvětrávacími otvory, jsou umístěny gumová těsnění. Plech je vybaven madly pro usnadnění manipulace. Model krytu včetně porovnání s vyrobeným kusem je znázorněn na obrázku 3.4. Výkresová dokumentace přípravku pro utěsnění odvětrávacích otvorů hlavně včetně modelu viz. elektronická příloha 2.

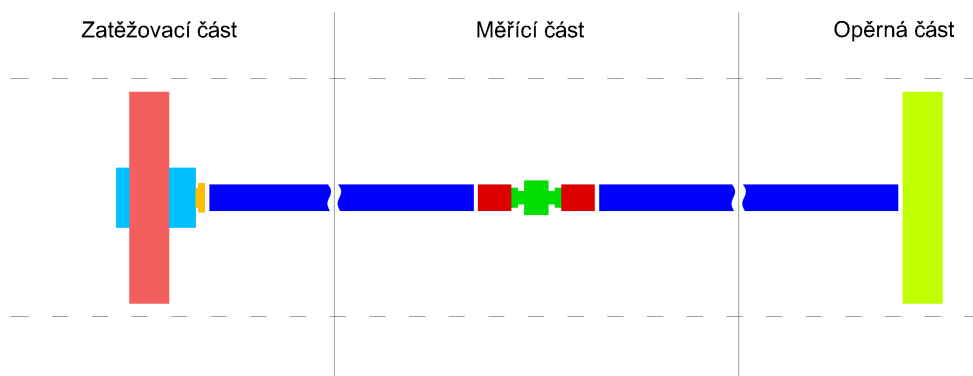


Obrázek 3.4: Model přípravku pro utěsnění (vlevo), realizovaný přípravek pro utěsnění umístěný v zařízení SHPB (vpravo)

### 3.4 Silová kalibrace

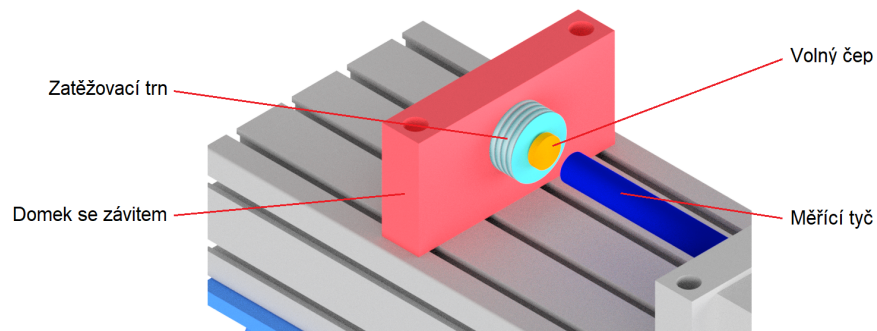
Proces silové kalibrace tenzometrických snímačů je nezbytný pro ověření správnosti naměřených hodnot. Přípravkem pro silovou kalibraci nebylo původní řešení zařízení SHPB vybaveno. Podstatou této sestavy dílčích prvků je porovnání hodnot sil, které jsou měřené přímo pomocí kalibrovaného siloměru s hodnotami sil přepočtenými z měřených deformací tenzometrickými snímači při známých elastických vlastnostech tyčí.

Snímač síly je umístěn mezi incidentní a transmisní tyč místo měřeného vzorku. Získané kalibrace jsou tím platné přímo pro oblast umístění vzorku. Výhodou navrženého přípravku silové kalibrace je také kalibrace tenzometrických snímačů na již ustavených tyčích v zařízení SHPB, protože i v nezátíženém stavu nově ustavených měřicích tyčí může docházet k naměření nenulových hodnot na tenzometrických snímačích z důvodu předpětí těchto tyčí způsobeným jejich ustavením. Sestavu lze rozdělit do tří funkčních částí. Schéma rozmístění jednotlivých částí je znázorněno na obrázku 3.5. Výkresová dokumentace komponent silové kalibrace včetně modelu sestavy viz. elektronická příloha 3.



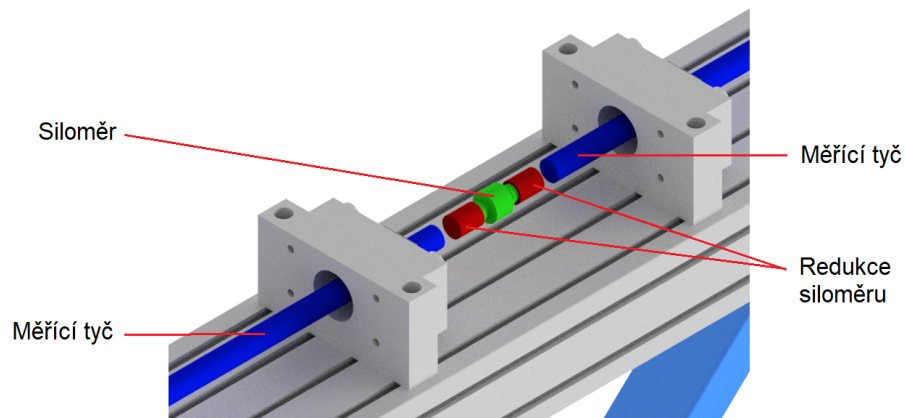
Obrázek 3.5: Schéma a pojmenování funkčních částí kalibrace

Zatěžovací část je tvořena domkem s vnitřním závitem, do kterého je zašroubovaný zatěžovací trn. Do zatěžovacího trnu je navíc vložen volný čep doléhající svým čelem na čelo měřicí tyče (viz obrázek 3.6). Domek se závitem je zafixovaný do profilu zařízení SHPB. Zatěžovací trn lze horizontálně polohovat pomocí otáčivého pohybu. Volný čep je do zatěžovacího trnu vložen s dostatečnou tolerancí, aby při rotaci trnu volně prokluzoval a nepřenášel tak krouticí moment na měřicí tyč.



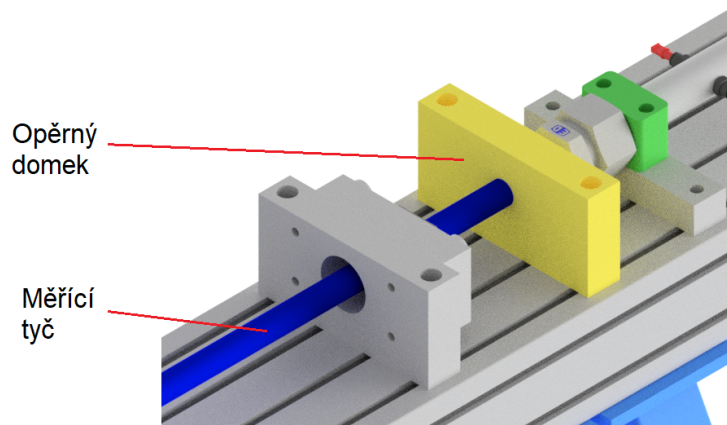
Obrázek 3.6: Model zatěžovací části sestavy

Měřicí část je tvořena jednoosým siloměrem, z obou stran zašroubovaný do redukci. Přes siloměr dochází k přenosu síly mezi incidentní a transmisní tyčí. Měřicí část je znázorněna na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7: Model zatěžovací měřicí sestavy

Opěrná část je tvořena pouze plným domkem, který je koncovým dílem celé sestavy kalibrace má funkci zarážky. Plný domek je zafixován k profilu zařízení SHPB, opírá se o něho incidentní tyč, čímž domek zabraňuje horizontálnímu posuvu tyče. Opěrná část je znázorněna na obrázku 3.8.

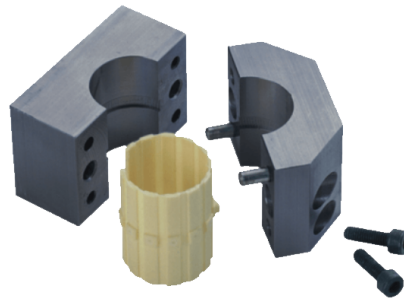


Obrázek 3.8: Model opěrné části sestavy

### 3.5 Modifikovaná pouzdra pro domky měřících tyčí

Ve stávajícím stavu nedisponovala pouzdra pro domky zařízení SHPB sofistikovanějším polohováním v horizontálním a vertikálním směru. Pouzdra se musela ručně nastavit do požadované polohy a stáhnout šrouby při současném držení pozice, která nebyla nějak vymezena. V procesu utahení šroubů tak mohlo dojít k pohybu pouzdra a ke změně polohy. Celá procedura se tak musela opakovat, což mělo za následek časově náročnější ustavení. Navíc velikost otvorů pro umístění kluzných ložisek těchto domeků nenabízela možnost výměny kluzných ložisek za typ s větším průměrem. Ložiskové domky nebyly dělené a během výměny transmisní nebo incidentní tyče se musely být tyče vysunuty. Jelikož jsou na měřících tyčích umístěny tenzometrické snímače, docházelo vysunutím ke zničení použitých tenzometrických snímačů. Tyto nedostatky zvyšují čas přípravy zařízení SHPB do provozu a prodražují provoz z důvodu nutnosti použití nových tenzometrických snímačů.

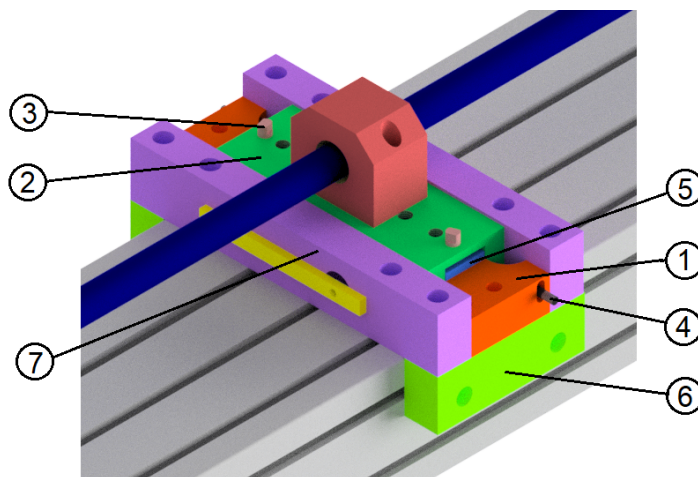
Navržené nové řešení modifikovaných pouzder je určeno pro dělené ložiskové domečky (viz. Obrázek 3.9). Po rozdělení těchto domečků lze snadno umístit měřicí tyče v kluzných ložiskových domečkách. Modifikovaná pouzdra mají funkci polohování dělených ložiskových domečků v normálové rovině k ose incidentní a transmisní tyče. Jsou kompatibilní s dělenými ložiskovými domečky s průměrem průřezu 25 mm (TJUM-05-25, Igus, USA) a s průměrem průřezu 40 mm (TJUM-05-40, Igus, USA). Výkresová dokumentace komponent sestavy modifikovaného pouzdra pro domky včetně modelu sestavy viz. elektronická příloha 4.



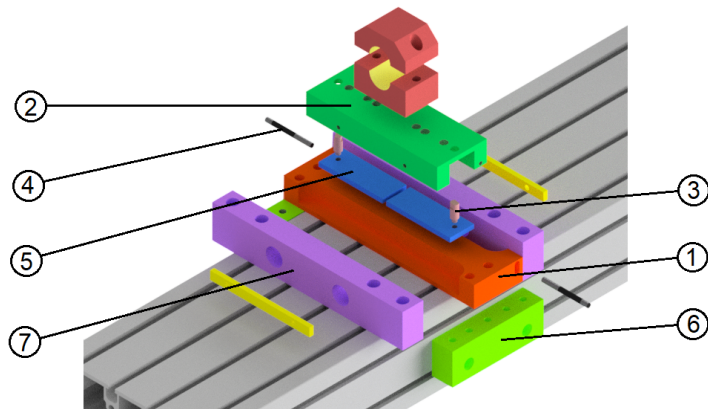
Obrázek 3.9: Ložiskový domeček TJUM-05, převzatý z [3]

Na obrázcích 3.10 a 3.11 je znázorněn model sestavy jednoho pouzdra domku s popisem jednotlivých dílů. Základna pouzdra (1) tvoří statickou nosnou část konstrukce pouzdra domku a zároveň tvoří základní vodící linii pro oba směry polohování. Držák pouzdra (2) je polohovatelný v rovině kolmé k ose tyče a je k němu připevněn dělený ložiskový domeček. Vertikální/horizontální vodící tyče (3/4) jsou hlavní vodící linie pro vertikální/horizontální pohyb držáku pouzdra, přičemž vertikální vodící tyče (3) jsou našroubovány na podpory držáku pouzdra (5) a horizontální vodící tyče (4) jsou našroubovány na držák pouzdra (2). Boční záklopy (6) slouží k upevnění základny pouzdra k profilu. Záklopy pouzdra (7) tvoří opory pro fixaci polohy držáku pouzdra sevřené pomocí šroubů.

Koncept navrženého řešení by byl zcela funkční, ale nebyl nakonec z ekonomických důvodů realizován. Sestava pouzdra pro ložiskové domky byla po nacenění výrobcem velmi nákladná na výrobu, proto se muselo od výroby upustit a navrhnout nové řešení obsahující méně komponent. Toto řešení bylo nakonec realizováno, ale není dalším předmětem této práce.



Obrázek 3.10: Model sestavy pouzdra



Obrázek 3.11: Model sestavy rozebraného pouzdra

## 3.6 Hybridní optický polohovací systém

### 3.6.1 Úvod

Nejpodstatnější částí vylepšení stávajícího zařízení SHPB je modifikace stojanu pro optická zařízení sloužící pro záznam průběhu deformace vzorku. Ústav mechaniky a materiálů ve velké míře využívá metody Digitální korelace obrazu (z ang. Digital Image Correlation - DIC) - optické metody vyhodnocující pole posunutí na základě obrazových dat. V dvourozměrné korelaci obrazu jsou posunutí přímo detekována z digitálních snímků snímaného povrchu vzorku optickým zařízením. Následně jsou v sekvenci obdržených snímků vyhledávány pohyby zvolených bodů v průběhu deformačního děje. Kvůli tomu, že je téměř nemožné nalézt shodný bod použitím jediného pixelu, se využívá oblasti s více pixely (například 20 x 20 pixelů) k nalezení shody. Tato oblast, obvykle nazývána tzv. *subset*, vyžaduje specifické rozložení intenzity světla (úroveň šedé). Předpokládá se, že rozložení intenzity světla se během deformace vzorku nemění. Posun subsetu na referenčním snímku je na snímku deformovaném nalezen vyhledáním oblasti se stejným rozložením intenzity světla subsetu. Jakmile je umístění subsetu na deformovaném vzorku nalezeno, lze zjistit posunutí podmnožiny [4]. Pro zajištění lepších podmínek pro DIC je vhodné povrch vzorku opatřit kontrastní texturou. Pokud těmito vlastnostmi povrch vzorku nedisponuje, musí být vytvořen umělý náhodný vzor (např. nástříkem).

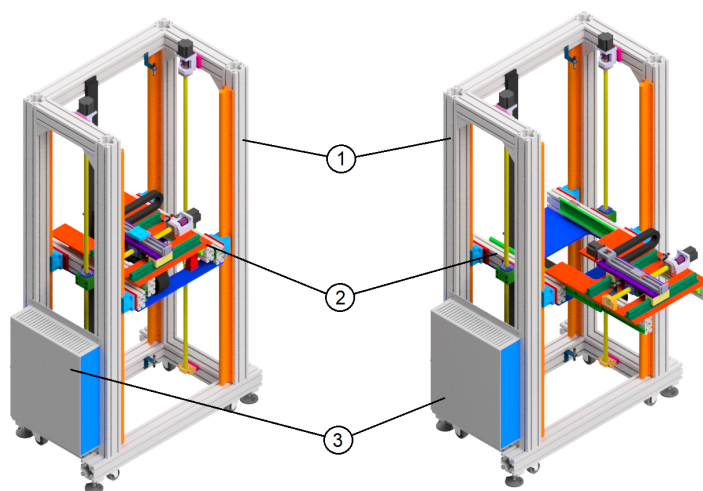
Pro přesnost a proveditelnost metody DIC jsou klíčová kvalitní obrazová data, která lze získat za pomoci správného optického nastavení. V původním stavu se optická zařízení (rychlomera, laboratorní kamera, fotoaparát) pro měření metodou DIC umísťovala na běžný stativ, u kterého bylo obtížné dosáhnout požadované přesnosti optického měření. Bylo tedy časově náročné optické



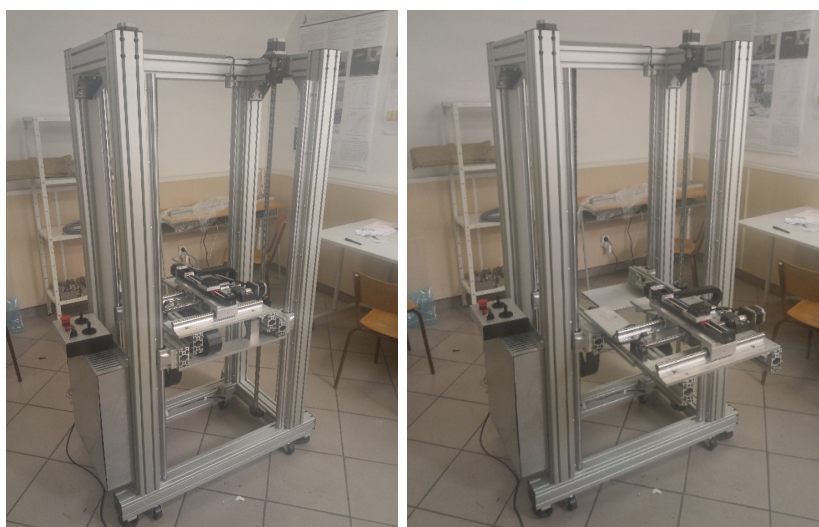
měřicí zařízení zaostřit. Zejména u trhací stolice je navíc nutnost překlenout rám tohoto zařízení, který zmenožňoval maximální přiblížení optické soustavy ke zkoumanému vzorku.

K řešení výše definovaných problémů je určeno hybridní optické polohovací zařízení (HOPS - Hybrid Optics Positioning System) navržené jako mobilní tříosý polohovací systém, který je plně motorizovaný. Zařízení je navrženo jako hybridní, tj. umožňuje běžně používaný stativ plně nahradit pro další experimentální soustavy (padostroj, zatěžovací stolice atd.). Zvýšený důraz byl kladen na přesnost osy určené k ostření. Zařízení je vybaveno pojezdovými koly, aby byla zajištěna jeho mobilita, navíc jeho vnější rozměry jsou přizpůsobeny pro průjezd zárubněmi referenčních dveří (600 mm). 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.

V následujících kapitolách budou postupně představeny jednotlivé funkční celky této sestavy. Na obrázku 3.12 je znázorněno porovnání teleskopického výsuvu zařízení HOPS včetně označení funkčních celků. Celá sestava je rozdělena na vnější konstrukci (1), teleskopický portál s výsuvným stolcem (2) a skříň elektronického zapojení (3). Výkresová dokumentace všech dílů vyrobených na zakázku a model celé sestavy zařízení HOPS viz. elektronická příloha 5.



Obrázek 3.12: Model sestavy HOPS se základním rozdělením podsestav (vlevo je teleskopický portál plně zasunut a vpravo plně vysunut)



(a) Realizované zařízení HOPS při nulovém vysunutí (b) Realizované zařízení HOPS při plném vysunutí

Obrázek 3.13: Porovnání nulového a plného výsuvu realizovaného zařízení HOPS

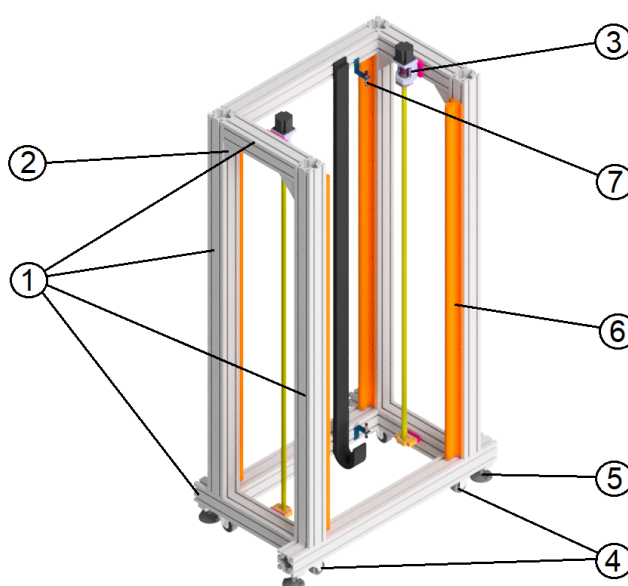
### 3.6.2 Vnější konstrukce

Vnější konstrukce zajišťuje tuhost, mobilitu a polohování ve vertikální ose. Model sestavy je znázorněn na obrázku 3.14. Tuhost je zajišťována profily z hliníkové slitiny o průřezu 80 x 80 mm (108080, Alutec KK s.r.o., Česká republika) (1), které jsou ve spodní části vzájemně sešroubovány. Ve vrchní části je spojení zajištěno pomocí fixačních úhelníků (74x76-307476, Alutec KK s.r.o., Česká republika) (2) umožňujících pomocí drážek přesné ustavení vertikální osy. Fixační úhelníky umožňují výškové nastavení nosných profilů, ke kterým je upevněna sestava kuličkového šroubu pro vertikální posun (3). Vnější konstrukce disponuje možností umístění deskového závaží na přečnívající konce hliníkového profilu v dolní části sestavy. S možností upevnění deskového závaží jako protiváhy je počítáno v případě možné nestability konstrukce (tendence k překlpení), která by mohla být způsobena vysunutím teleskopického portálu v případě velké hmotnosti optického zařízení.

Mobilita vnější konstrukce je umožněna pomocí čtyř pojezdových koleček (3430POI058P60, Alutec KK s.r.o., Česká republika) (4) Jedno pojezdové kolečko disponuje nosností až 100 kg. Zajištění stabilního umístění zařízení HOPS je realizováno čtyřmi stavěcími patkami (418012, Alutec KK s.r.o., Česká republika) (5), které jsou ke konstrukci z profilů připevněny pomocí upínacích přírub profilu typu (524080.12, Alutec KK s.r.o., Česká republika).

Vertikální pohyb teleskopického portálu je veden čtveřicí shodných podepřených tyčí (SBR-30, Lishui Hengli Automation Technology, Čína) (6) s průměrem 30 mm, připevněných na profil

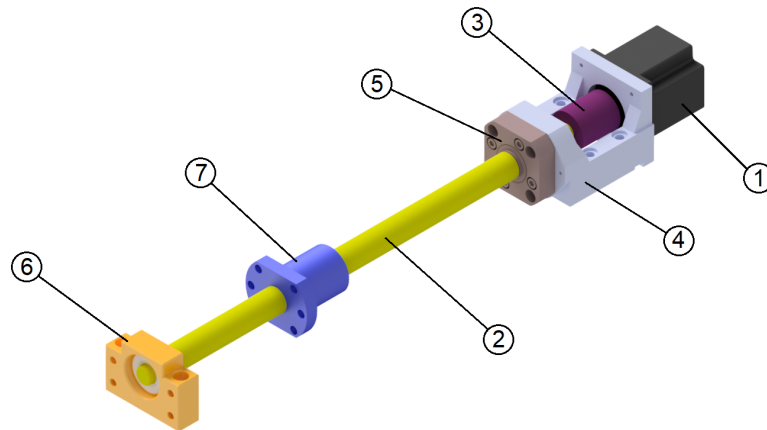
vnější konstrukce. Vnitřní konstrukce je vedena přes otevřené přírubové vozíky (TBR-30, Lishui Hengli Automation Technology, Čína) s oběžnými kuličkami a nastavitelnou vůlí pro podepřenou tyč. Polohování ve vertikální ose je umožněno dvojicí identických a synchronizovaných motorizovaných os. Vertikální pohyb je v obou směrech omezen indukčními koncovými spínači (IPS-12POC4B, Ibest Electrical, Čína) (7), které zabráňují dalšímu pohybu daným směrem tak, aby nedošlo ke kolizi teleskopického portálu s vnější konstrukcí. Indukční snímače jsou k profilu vnější konstrukce přichyceny pomocí plechových úchytů. Na pohyblivých dílech jsou instalovány plíšky z feromagnetického materiálu pro spínání koncových indukčních spínačů.



Obrázek 3.14: Model sestavy vnější konstrukce

Schéma jedné motorizované osy s pojmenováním jednotlivých komponent je znázorněno na obrázku 3.15. Krokový motor (SX23-1414 NEMA23, Microcon, Česká republika) (1) zajišťuje rotační pohyb kuličkového šroubu (2), se kterým je prostřednictvím pružné spojky (LK20-C30/8-12, COUP-LINK, Čína) (3) spojen. Díky použití pružné spojky je zajištěna kompenzace nesouosých hřídelí kuličkového šroubu a krokového motoru. Držák motoru (MBA15-C, SYK Sonyung Industry, Taiwan) (4) tvoří také základnu, která je připevněna k profilu konstrukce a do které je připojena ložisková jednotka s pevným uchycením (FK15 C7, SYK Sonyung Industry, Taiwan) (5), která zároveň fixuje kuličkový šroub. Z druhé strany kuličkového šroubu je použita ložisková jednotka s volným uchycením (BF15, SYK Sonyung Industry, Taiwan) (6). Kuličkový šroub má průměr 20 mm se stoupáním 5 mm. Dvojice motorizovaných os zajišťuje vertikální pohyb pro vnitřní konstrukci skrze kompatibilní matice kuličkového šroubu (SF2005, SYK Sonyung

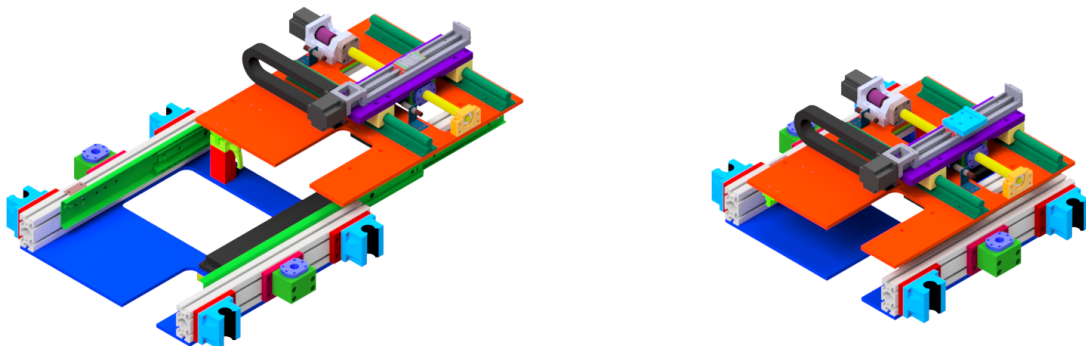
Industry, Taiwan) (7).



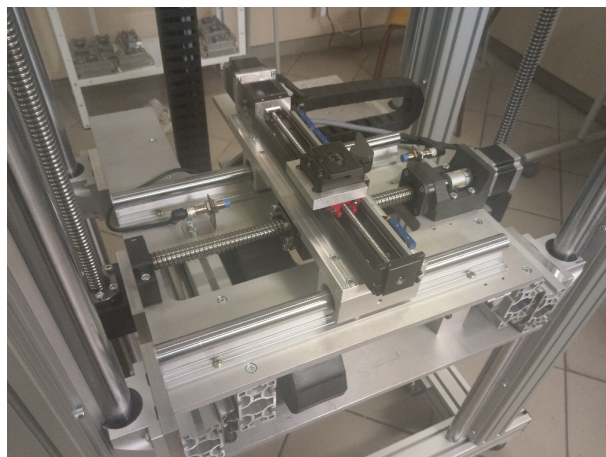
Obrázek 3.15: Model sestavy kuličkového šroubu

### 3.6.3 Teleskopický portál s výsuvným stolcem

Funkcí vnitřní konstrukce zařízení SHPB je polohování optického zařízení v horizontálních osách včetně dodatečného teleskopického výsuvu pro překlenutí např. přechýlajících hran rámu experimentálních sestav. Na obrázku 3.16 je znázorněn teleskopický výsuv při plném a nulovém vysunutí, jehož podstatou je maximalizace přiblížení optického zařízení ke zkoumanému vzorku při experimentu. Tuhostní a nosnou funkci vnitřní konstrukce zajišťuje vrchní a spodní deska. Každá z desek slouží k připevnění dílčích komponent a jsou vyhotoveny na míru s jemnou tolerancí přesnosti.



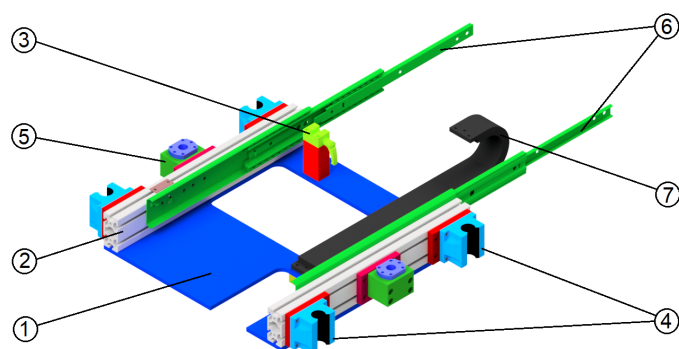
Obrázek 3.16: Model teleskopického výsuvu při nulovém a plném a nulovém vysunutí



Obrázek 3.17: Detail realizovaného křížového stolku

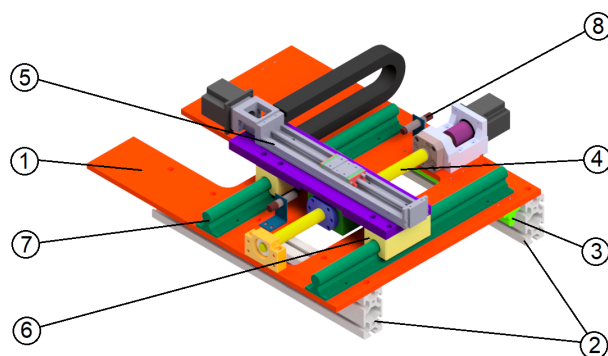
Model spodní desky je znázorněn na obrázku 3.18. Ke spodní desce (1) je z vrchní strany přišroubována dvojice hliníkových profilů (104080, Alutec KK s.r.o., Česká republika) (2) s průřezem 40x80 mm a manuální brzda (HKR1200A, Hiwin, Japonsko) (3). K profilům se z vnější strany fixují komponenty umožňující vertikální posuv, který je popsán v sekci 3.6.2. Jedná se o čtveřici vozíků (TBR-30, Lishui Hengli Automation Technology, Čína) (4) pro podepřené tyče a dvojici držáků matic (MGD-20, SYK Sonyung Industry, Taiwan) (5). Vozíky jsou určeny pro vedení vertikálního posuvu a držáky matic realizují fixaci matic kuličkového šroubu. Tyto komponenty pro vertikální posuv jsou k hliníkovému profilu upevněny pomocí redukci. Z vnitřních stran profilů je připevněna dvojice tuhých teleskopických vedení (TITAN D TR-7118, Thomas Regout International BV, Nizozemsko) (6), které zajišťují teleskopický výsuv vrchní desky. Manuální brzda má funkci aretace teleskopického výsuvu vrchní desky v požadované pracovní poloze. Spodní strana spodní desky je osazena redukcí pro přichycení koncových částí energetických řetězů (15BF02, JFLO, Čína) (7). První energetický řetěz má opačný konec fixovaný k vrchnímu rámu vnější konstrukce a druhý energetický řetěz je na opačném konci upevněn ke spodní straně vrchní desky. Tyto energetické řetězy slouží k ochraně kabelů a k jejich vedení po celém zdvihu.

Model vrchní desky je znázorněn na obrázku 3.19. K vrchní desce (1) je ze spodní strany přišroubována dvojice hliníkových profilů (2) s průřezem 40x80 mm a podepřená tyč (SBR-12, Lishui Hengli Automation Technology, Čína) (3). Podepřená tyč je určena jako aretační vedení pro manuální brzdu, s dostatečnou délkou pro možnost aretace teleskopického výsuvu v libovolné poloze. Hliníkové profily jsou z vnějších stran přimontovány k teleskopickému vedení. Z vrchní strany má horní deska účel základny pro křížový stolek určený pro polohování optického zařízení ve dvou navzájem kolmých horizontálních osách. Pro směr kolmý ke směru teleskopického výsuvu je pohyb měřicího zařízení řešen sestavou kuličkového šroubu (4) stejným způsobem, jako



Obrázek 3.18: Model spodní části teleskopického výsuvu

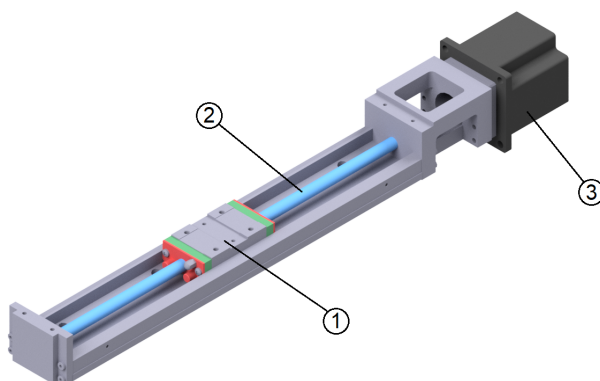
tomu bylo pro vertikální posuv. Jediným rozdílem je zde použití výrazně kratšího kuličkového šroubu a vodicích podepřených tyčí s menším průřezem. Sestava kuličkového šroubu zde polohuje modulem určeným pro ostřící směr pohybu. Pro směr ostření bylo výhodné použít modul jako hotové řešení namísto běžné sestavy kuličkového šroubu, protože modul disponuje vyšší přesností polohování a nebylo nutné sestavovat osu z jednotlivých komponent. Jedná se o lineární modul přesného lineárního vedení (KK5002C-300A1, Hiwin, Japonsko) (5) s pracovní délkou 300 mm, který je veden dvojicí otevřených vozíků (SME-20L, Lishui Hengli Automation Technology, Čína) (6) po podepřených tyčích (SBR-20, Lishui Hengli Automation Technology, Čína) (7). Pohyb osy sestavy kuličkového šroubu je oboustraně omezena indukčními koncovými spínači (IPS-12POC4B, Ibest Electrical, Čína) (8), které mají stejnou funkci jako koncové spínače pro vertikální pohyb.



Obrázek 3.19: Model vrchní části teleskopického výsuvu

Lineární modul funguje na stejném principu jako sestava kuličkového šroubu (viz. Obrázek 3.20).

Disponuje integrovaným vozíkem (1), kterým je pohybováno pomocí kuličkového šroubu (2). Stejně jako je tomu u ostatních os, je i pro tento modul použit stejný krokový motor (3). Modul zajišťuje vysokou přesnost posuvu vozíku ( $20\ \mu\text{m}$ ), na kterém je umístěna stativová destička pro umístění optického zařízení. Pohyb vozíku je rovněž omezen integrovanými indukčními koncovými spínači, kterými je modul vybaven. Umístěn je na příslušné redukční desce, která je dále aretována s vozíky pro posuv v kolmé ose. K redukční desce je také připojen energetický řetěz (10BF03, JFLO, Čína), jehož opačný konec je umístěn na vrchní desce.



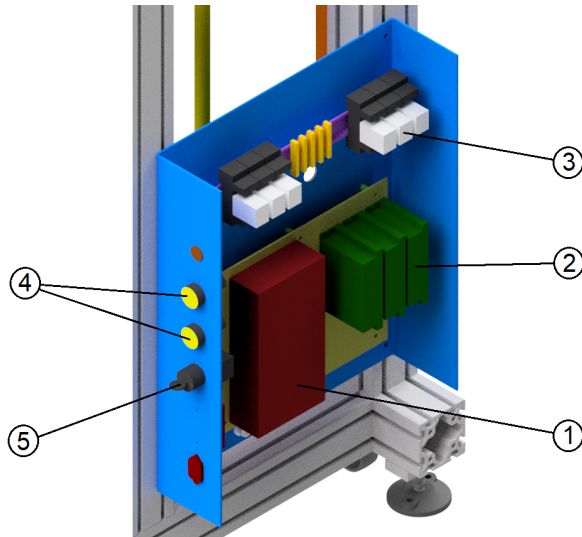
Obrázek 3.20: Model lineárního modulu s krokovým motorem

### 3.6.4 Elektronická výbava

Komponenty elektronického zapojení jsou rozmístěny ve dvou celcích. Prvním celkem je skříň pro elektroniku, kde elektronické obvody zajišťují správnou úroveň proudu a napětí do krokových motorů a indukčních koncových spínačů. Dále tyto elektronické součásti ovlivňují chod krokových motorů na základě příchozí informace. Druhým celkem je ovládací tablo, jehož prvky jsou určeny k ovládání celého zařízení HOPS přímo obsluhou.

Na obrázku 3.21 je znázorněna sestava skříně pro elektroniku s příslušným označením komponent. Zařízení HOPS je napájeno napětím 230 V ze sítě. Napájení je nejprve vedeno do skříně pro elektroniku, kde je vstupní hodnota napětí redukována na hodnotu 24 V zdrojem a adaptérem. Adaptér je dodatečně propojen s ovládacími prvky pro zabezpečení a se spínacím napájecím zdrojem (1), který výstupní proud a napětí dále rozvádí do indukčních koncových spínačů a autonomních digitálních driverů s podporou analogových vstupních signálů (DM805AI, Leadshine Technology, USA) (2). Drivery zajišťují řízení motorizovaných os a jsou řízeny ve velocity módu (řízení rychlosti otáčení krokového motoru). Jejich činnost je řízena zapojenými joysticky a také výstupní informací z indukčních koncových spínačů. Joysticky jsou umístěny zvlášť v ovládacím tablu. Indukční koncové spínače jsou připojeny přes relé (3) a zajišťují zastavení pohybu kroko-

vých motorů daným směrem v případě sepnutí koncových spínačů. Ovládací díly pro zabezpečení jsou umístěny ve stěně skříně pro elektroniku, přičemž se jedná o dvojici signálních LED diod (4) signalizujících připojení k napětí 230 V a 24 V a ovladač s klíčem (5), pro možnost odpojení zdroje ze sítě a zastavení všech pohybových os.



(a) Model otevřené skříně pro elektronickou výbavu



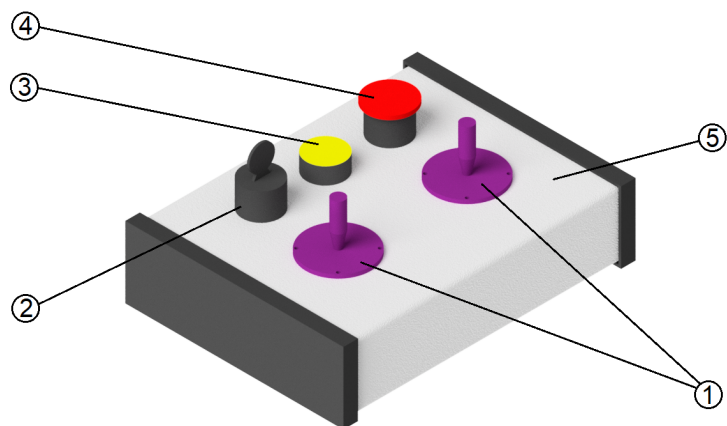
(b) Realizovaná skříň pro elektronickou výbavu

Obrázek 3.21: Skříň pro elektronickou výbavu

Na základě požadavku ovládat zařízení HOPS od počítače, kde obsluha přímo sleduje výstup z optického zařízení, bylo navrženo ovládací tablo, které je k zařízení HOPS připojeno prodlužovacím kabelem. Toto řešení také umožňuje ovládání optické části experimentu pouze jednou osobou. Model sestavy ovládacího tabla je znázorněn na obrázku 3.22. Ovládací tablo je vybaveno dvojicí joysticků (1), ovladačem na klíč (2) pro odemknutí joysticků, signální LED diodou pro signalizaci odemknutí joysticků (3) a ovladačem nouzového zastavení (4) pro odpojení ze sítě. První z joysticků je samostatně určený pro polohování osy ostření, druhý ovládá ostatní polohovací osy. Takovéto rozdělení je voleno z toho důvodu, že nejprve je třeba nastavit polohu optického zařízení tak, aby jeho objektiv zabíral celý zkoumaný vzorek a až poté se provádí ostření. U ostření je žádoucí, aby se během manipulace nemohla posunout některá z dalších os při vychýlení joysticku. Všechny zmíněné komponenty ovládacího tabla jsou integrovány v hliníkové krabičce (U-1455T2202, Hammond Mfg. Co. Ltd., Kanada) (5). Ovládací tablo je se skříní elektronického zapojení propojeno 14-žilovým kabelem, který je oboustranně zakončen konektory (T 3650 001, Amphenol Industrial, USA) pro připojení do konektorů na ovládacím tablu a skříní elektronického zapojení (T 3653 004, Amphenol Industrial, USA). Blokové schéma elektrického



zapojení je znázorněno na obrázku 3.23. Podrobné schéma elektronického zapojení je znázorněno v elektronické příloze 5 společně s modelem sestavy ovládacího tabla.

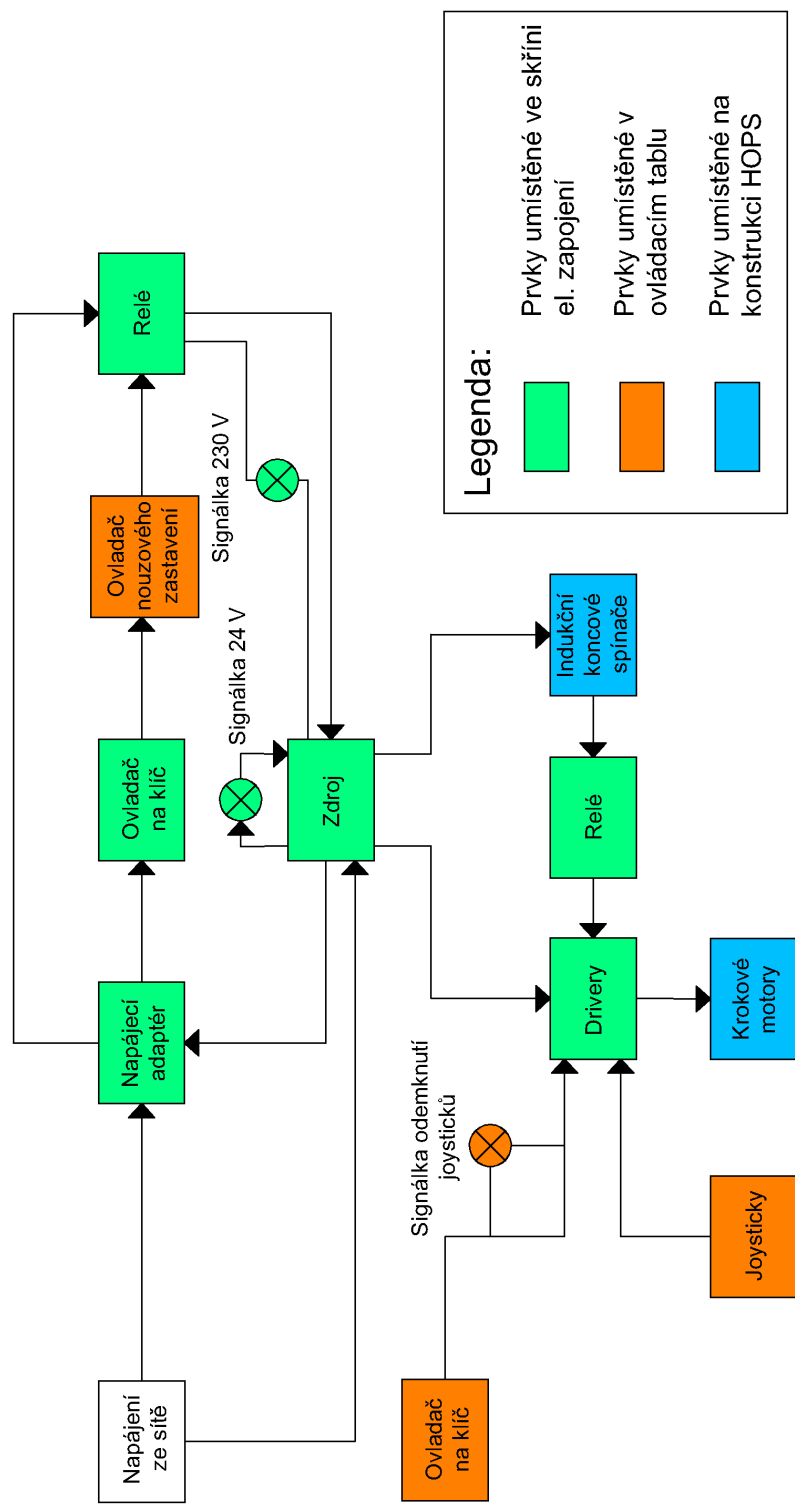


(a) Model sestavy ovládacího tabla



(b) Realizované ovládací tablo

Obrázek 3.22: Ovládací tablo



Obrázek 3.23: Blokové schéma elektrického zapojení

# Kapitola 4

## Výsledky

### 4.1 Ověření funkčnosti dílčích prvků SHPB

Navržené díly (kromě zařízení HOPS) byly ověřeny několika sériemi experimentálních zkoušek, z nichž některé byly použity v rámci publikace v impaktovaném časopise [6]. Ochranné krytování prostoru vzorku správně zabezpečuje měřící techniku a obsluhu před možným únikem úlomků vzorku. Rovněž také zabraňuje propadávání nečistot a zdeformovaného vzorku do drážek hliníkového profilu zařízení SHPB. Přípravek pro utěsnění odvětrávacích otvorů hlavně vyhovuje požadavku snížení času potřebnému pro nabití projektilu. Utěsnění odvětrávacích otvorů hlavně je díky přípravku provedeno téměř okamžitě. U přípravku silové kalibrace se hodnoty deformace měřené tenzometrickými snímači a přepočítané na silové hodnoty snadno porovnávají se silovými hodnotami získanými kalibrovaným snímačem síly. Díky jednoduchému způsobu provedení přípravku je proces kalibrace přímočarý a rychlý. V následující sekci je popsán experiment, který ověřuje funkčnost zařízení HOPS jehož realizace byla stěžejní částí této práce.

### 4.2 Ověřovací experiment pro zařízení HOPS

Ověření funkčnosti zařízení HOPS bylo provedeno v průběhu ostrých experimentálních zkoušek auxetických struktur. Pro tyto zkoušky bylo zařízení SHPB modifikováno na zařízení OHPB (z ang. Open Hopkinson Pressure Bar)[7]. Z pohledu zařízení HOPS je tato modifikace nevýznamná a jen prokazuje univerzálnost jeho použití. Modifikace OHPB se od původního řešení SHPB liší hlavně tím, že disponuje incidentní tyčí a projektil jako jedním celkem v podobě nárazové tyče. Nárazová tyč délky přibližně 1200 mm byla osazena tenzometrickými snímači v polovičním Wheatsonově můstku, vzdálenými 20 cm od čela narážejícího do vzorku. Transmisní tyč byla osazena identickým zapojením tenzometrických snímačů ve vzdálenosti 20 cm od čela tyče doléhající na

vzorek. Obě tyče jsou vyrobeny ze stejné hliníkové slitiny a o shodném průměru 20 mm.

Pro experiment byl použit vzorek s auxetickou strukturou *2D re-entrant*. Materiál s auxetickou strukturou se vyznačuje záporným Poissonovým číslem, tudíž se jeví jako vhodný materiál pro pohlcení velkého množství mechanické energie v průběhu rychlých dynamických dějů [2, 6], které lze zkoumat pomocí zařízení SHPB. Testovaný vzorek měl rozměry 12,23 x 12,24 x 6,36 mm (š x d x v) a byl vyroben z prášku z nerezové oceli pomocí metody laserového spékání (z ang. SLS - Selective laser sintering). Model auxetické struktury sloužící jako podklad pro metodu SLS a konkrétní vzorek použitý při experimentu jsou znázorněny na obrázku 4.1.

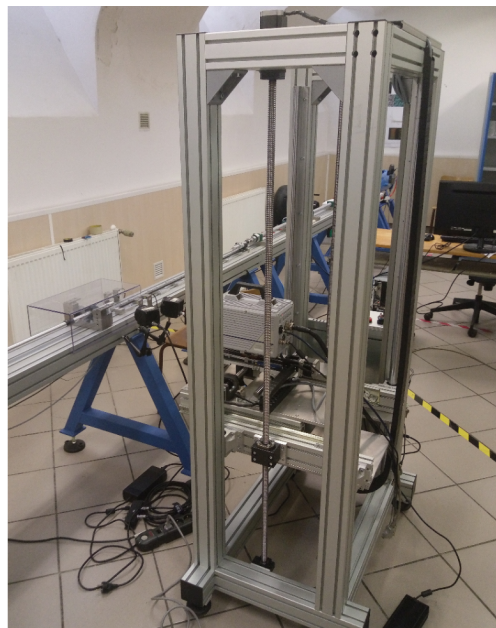
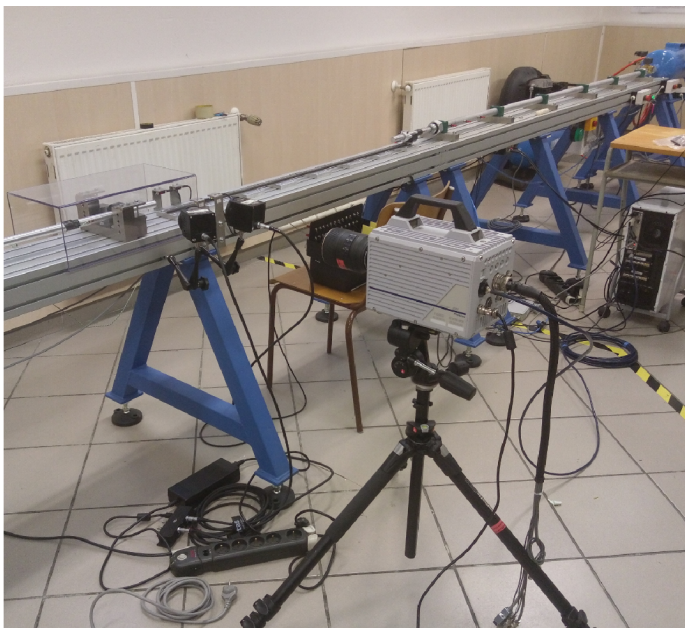


Obrázek 4.1: Model auxetické struktury *2D re-entrant*, převzato z [2] (vlevo), vzorek INVH2D-01 (vpravo)

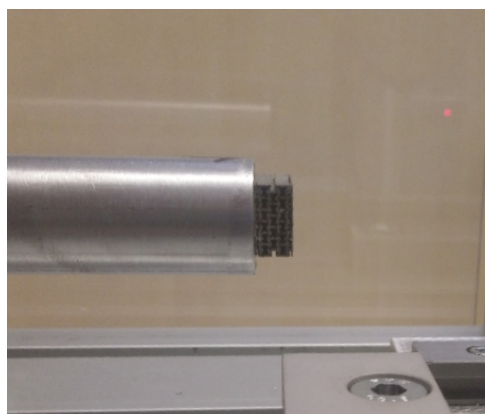
Vzorek byl umístěn na transmisní tyč (viz. Obrázek 4.3), prichycen pomocí tenké vrstvy vazelíny. Jelikož kvalita obrazu zachyceného rychlokamerou závisí zejména na dostatečném osvětlení, je vzorek nasvícen pomocí páru vysoce svítivých LED světel. Následně byl tlak vzdušníku navýšen na 4 bary a poté uvolněn. Tím došlo k urychlení nárazové tyče, která nárazem do vzorku způsobila jeho deformaci. Průběh deformace byl úspěšně zaznamenán rychlokamerou umístěnou na zařízení HOPS a uložen do paměti počítače. pro další zpracování.

Proces rázu během experimentu byl zaznamenán rychlokamerou (Fastcam SA5, Photron, Japan) nově umístěnou na zařízení HOPS. Na obrázku 4.2 je znázorněno porovnání umístění rychlokamery na běžném stativu (původní používané řešení) s novým řešením. Při přípravě experimentu bylo nejprve zařízení HOPS přistaveno k experimentální sestavě OHPB. Rychlokamera byla umístěna na teleskopický portál a fixována pomocí stativové destičky. Poté se zařízení HOPS uvedlo do chodu a pomocí zpřístupněných joysticků se rychlokamera polohováním prvního z nich dostala do místa vhodného pro zaostření. Následně byl na monitoru počítače sledován obraz z

rychlokamery a provedlo se ostření pomocí druhého joysticku. Po finálním zaostření se joysticky opět zablokovali ovladačem na klíč, aby nedošlo k nechtěnému posuvu některé z os drknutím do joysticku. Celý proces ostření byl proveden jediným operátorem s výraznou časovou úsporou oproti původnímu řešení pomocí standardního fotografického stativu.



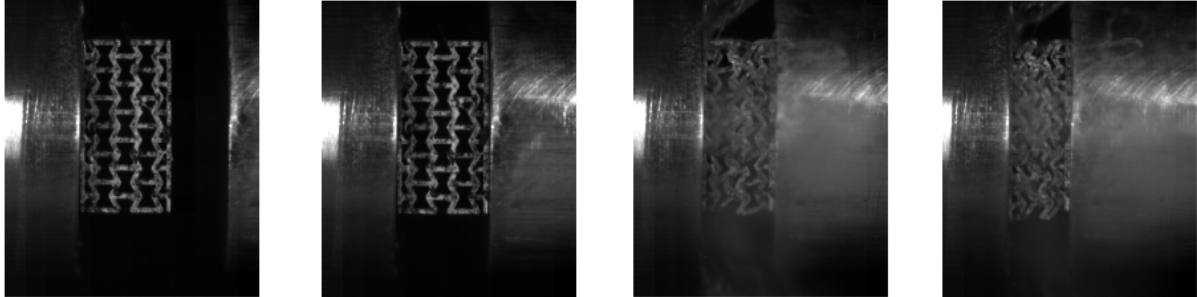
Obrázek 4.2: Srovnání umístění rychlokamery na běžném stativu (vlevo) a na zařízení HOPS (vpravo)



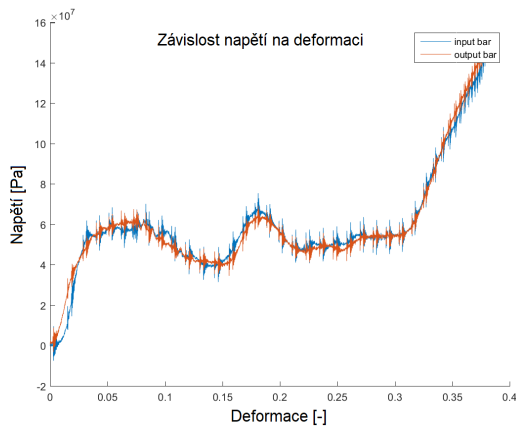
Obrázek 4.3: Transmisní tyč se vzorkem testované auxetické struktury

Na obrázku 4.4 je ukázka vybraných snímků zaznamenaného deformačního děje. Na snímcích s pokročilou deformací vzorku je obraz zastíněn částicemi vazelíny, což je dočasný nedostatek fixace vzorku na transmisní tyči, jelikož se jednalo se o pilotní experiment. Z naměřených tenzo-

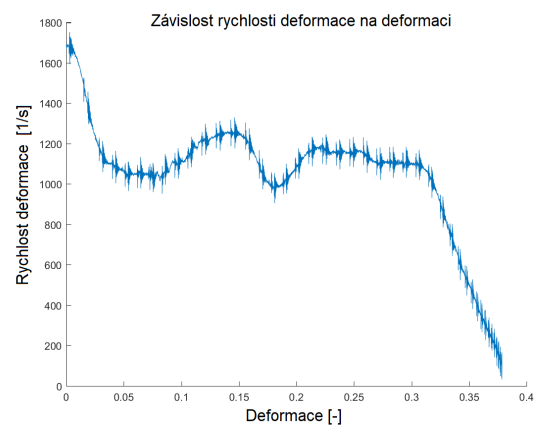
metrických dat byly vyhodnoceny charakteristické křivky: diagram napětí na deformaci vzorku a diagram závislosti rychlosti deformace na celkové. Z diagram napětí na deformaci vzorku je patrný správný průběh experimentu, který je potvrzen shodným průběhem obou měřících tyčí.



Obrázek 4.4: Průběh deformace vzorku typu *2D re-entrant*



(a) Graf závislosti napětí na deformaci



(b) Graf závislosti rychlosti deformace na deformaci

Obrázek 4.5: Diagramy získané ze zpracování naměřených dat

Během experimentu nedošlo k žádným komplikacím se zařízením HOPS. Experiment prokázal jeho správnou funkčnost a efektivitu. Příprava rychlokamery (tzn. upevnění, polohování a zaostření) zabrala výrazně méně času než v případě původního řešení. Upevnění zamezilo všem nežádoucím vibracím během chodu rychlokamery a polohování pomocí joysticků proběhlo hladce. Také nalezení vhodné polohy rychlokamery pomocí joysticků bylo přesné a časově rychlé.

# Kapitola 5

## Závěr

V této práci byly navrženy a realizovány dílčí prvky pro řešení nedostatků stávajícího řešení zařízení SHPB. Funkčnost všech realizovaných prvků byla náležitě ověřena experimenty a tím byla prokázána jejich efektivita oproti stávajícímu řešení. Realizovanými prvky jsou ochranné krytování prostoru vzorku, přípravek pro utěsnění odvětrávacích otvorů hlavně, přípravek silové kalibrace a zařízení HOPS. Jediný prvek, který nebyl realizován jsou modifikovaná pouzdra pro ložiskové domečky, a to z ekonomických důvodů. Nejvýznamnějším realizovaným prvkem bylo zařízení HOPS, které nahrazuje běžný stativ pro optická zařízení. Díky jeho realizace lze výrazně zjednodušit přípravu měření nejen pro zařízení SHPB, ale i pro další experimentální zařízení využívaných Ústavem mechaniky a materiálů jako jsou padostroj, trhací stolice, atd. Přípravek silové kalibrace a zařízení HOPS byly hlášeny jako funkční vzorky. Ochranné krytování prostoru vzorku, přípravek pro utěsnění a přípravek silové kalibrace byly součástí experimentální sestavy SHPB při experimentech na jejichž výsledcích vznikl článek v impaktovaném časopise [6].

Tištěná verze příloh obsahuje z úsporných důvodů pouze výběr nejdůležitějších prvků. Elektronická verze přílohy obsahuje kompletní výkresovou dokumentaci včetně softwarových modelů součástí ve formátu STEP. Modely a výkresová dokumentace všech navržených řešení byly vytvořeny v softwarovém prostředí Autodesk Inventor 2017.

Z důvodu problému s dodáním konektoru pro ovládací tablo k zařízení HOPS se nepodařilo integrovat prodlužovací kabel. Při ověřovacím experimentu bylo tablo připojeno pomocí jednotlivých žil. Toto omezení mělo vliv pouze na komfort obsluhy nikoli na celkovou funkci zařízení HOPS. Po dodání konektoru bude prodlužovací kabel realizován a zařízení HOPS bude plně dokončeno. I přes zmíněný nedodělek byly cíle práce naplněny a zařízení HOPS a ostatní realizované prvky plní svůj účel, což bylo dokázáno provedenými experimenty.

# Literatura

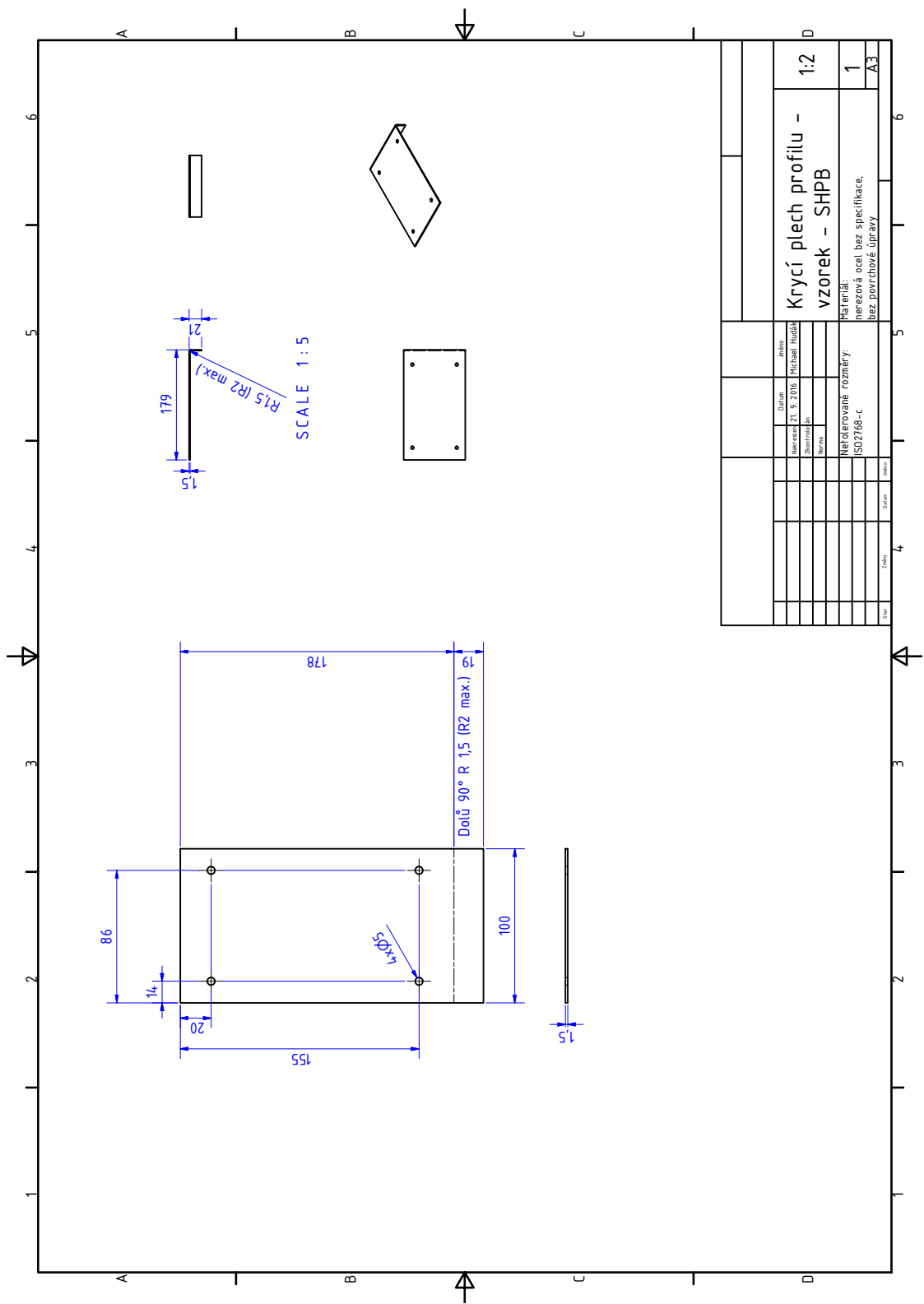
- [1] SHARMA, S., CHAVAN, V.M., AGRAVAL, R.G., PATEL, R.J., KAPOOR, R., CHAKRAVARTTY, J.K.: *Split-Hopkinson Pressure Bar: An Experimental Technique for High Strain Rate Tests* [online]. 2011, [cit. dne 19.8.2018].
- [2] Falta, Instrumentace sestavy dělené Hopkinsonovy tyče pro dynamická měření. Praha, 2017. Diplomová práce. Fakulta dopravní ČVUT, Ústav mechaniky a materiálů. Vedoucí diplomové práce Petr Zlámal, Tomáš Doktor.
- [3] *Hennlich* [online]. [cit. dne 19.8.2018]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/kluzna-pouzdra-a-vedeni-linearni-kluzna-vedeni-drylin-r-632/tjum-05.html>
- [4] YONEYAMA, S., MURASAVA, G.: *Digital Image Correlation* [online]. [cit. dne 19.8.2018]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/f385/e625349ff069bfe24e6860b646d5d0fe6f1f.pdf>
- [5] *Hiwin* [online]. [cit. dne 19.8.2018]. Dostupné z: <https://motioncontrolsystems.hiwin.com/Asset/KK-Series-Catalog.pdf>
- [6] Fíla, T., Zlámal, P., Jiroušek, O., Falta, J., Koudelka, P., Kytýř, D., Doktor, T., Valach, J.: *Impact testing of polymer-filled auxetics using split hopkinson pressure bar* DOI:10.1002/adem.201700076
- [7] Govender R.A., Cury R.J.: *The "Open" Hopkinson Pressure Bar: Towards Addressing Force Equilibrium in Specimens with Non-uniform Deformation* [online]. [cit. dne 25.8.2018]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40870-015-0042-2>



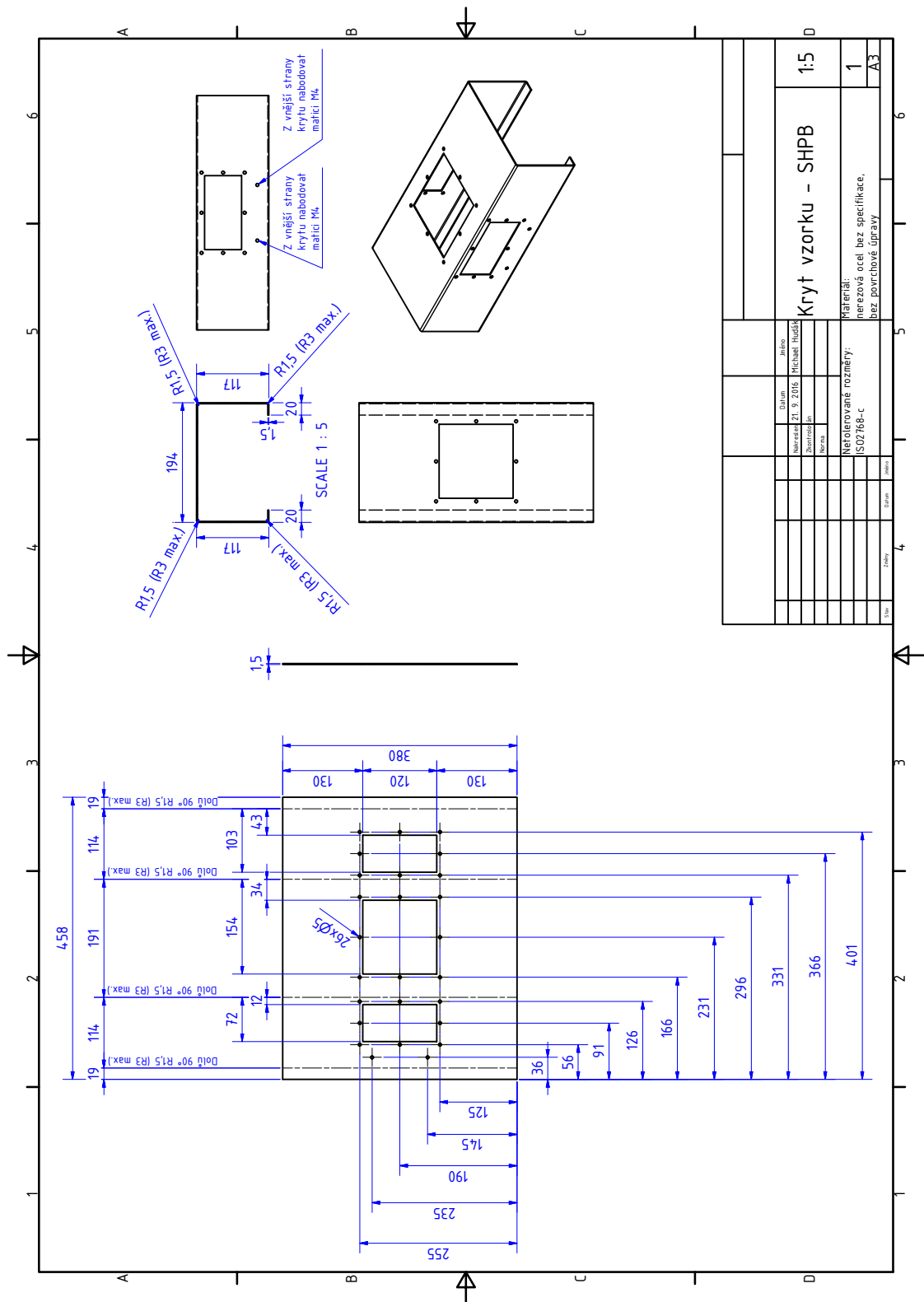
## Kapitola 6

# Obrazová příloha

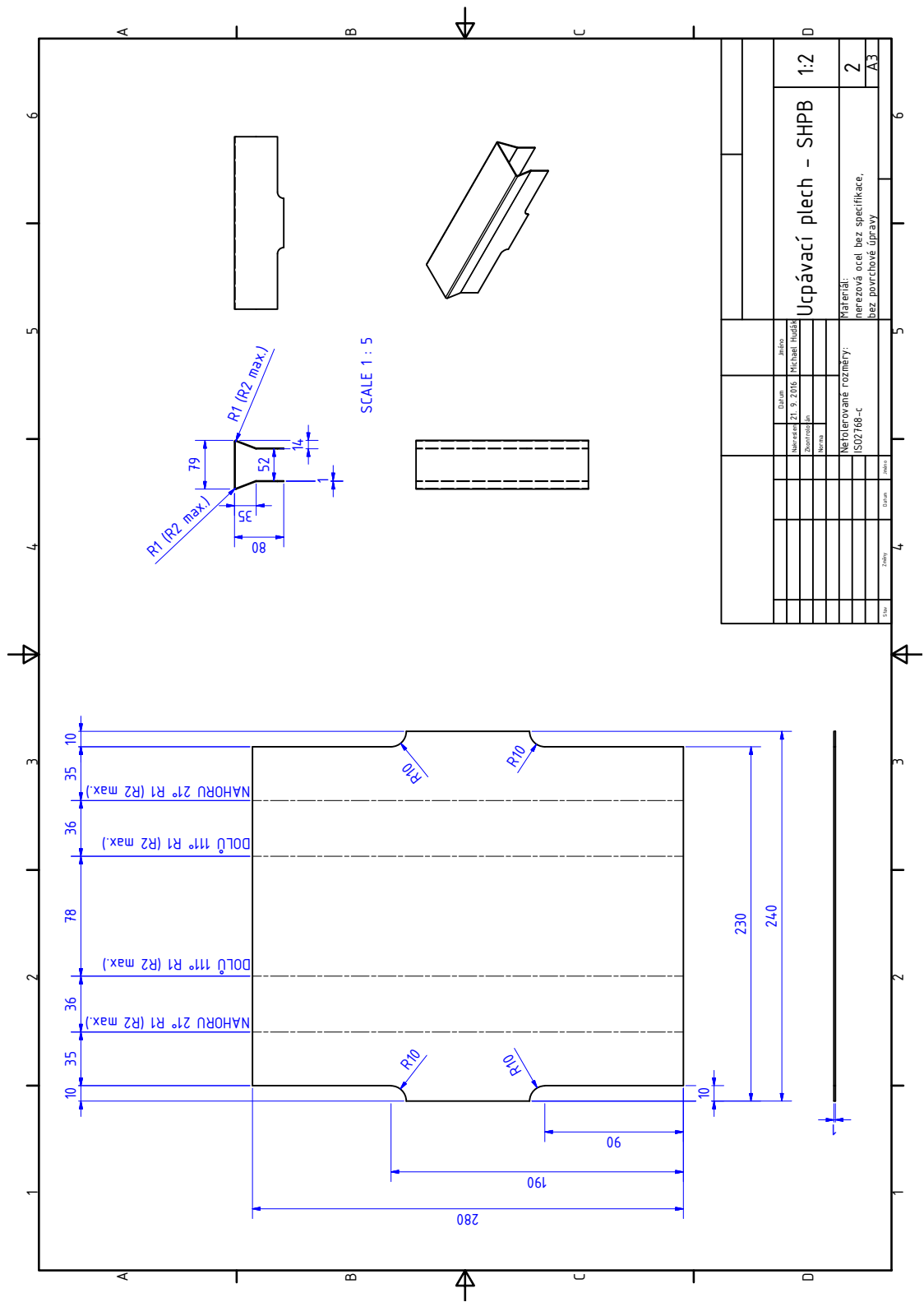
V elektronické příloze jsou umístěny veškeré přílohy, tj. výkresová dokumentace všech dílů včetně těch, které nejsou součástí obrazové přílohy (dílní prvky zařízení HOPS, dílní prvky silové kalibrace a dílní prvky modifikovaných pouzder pro domky). Příloha dále obsahuje modely jednotlivých dílů, případně sestav ve formátu STEP. V této obrazové příloze jsou pouze nejdůležitější části jednotlivých celků z důvodu úspory místa.



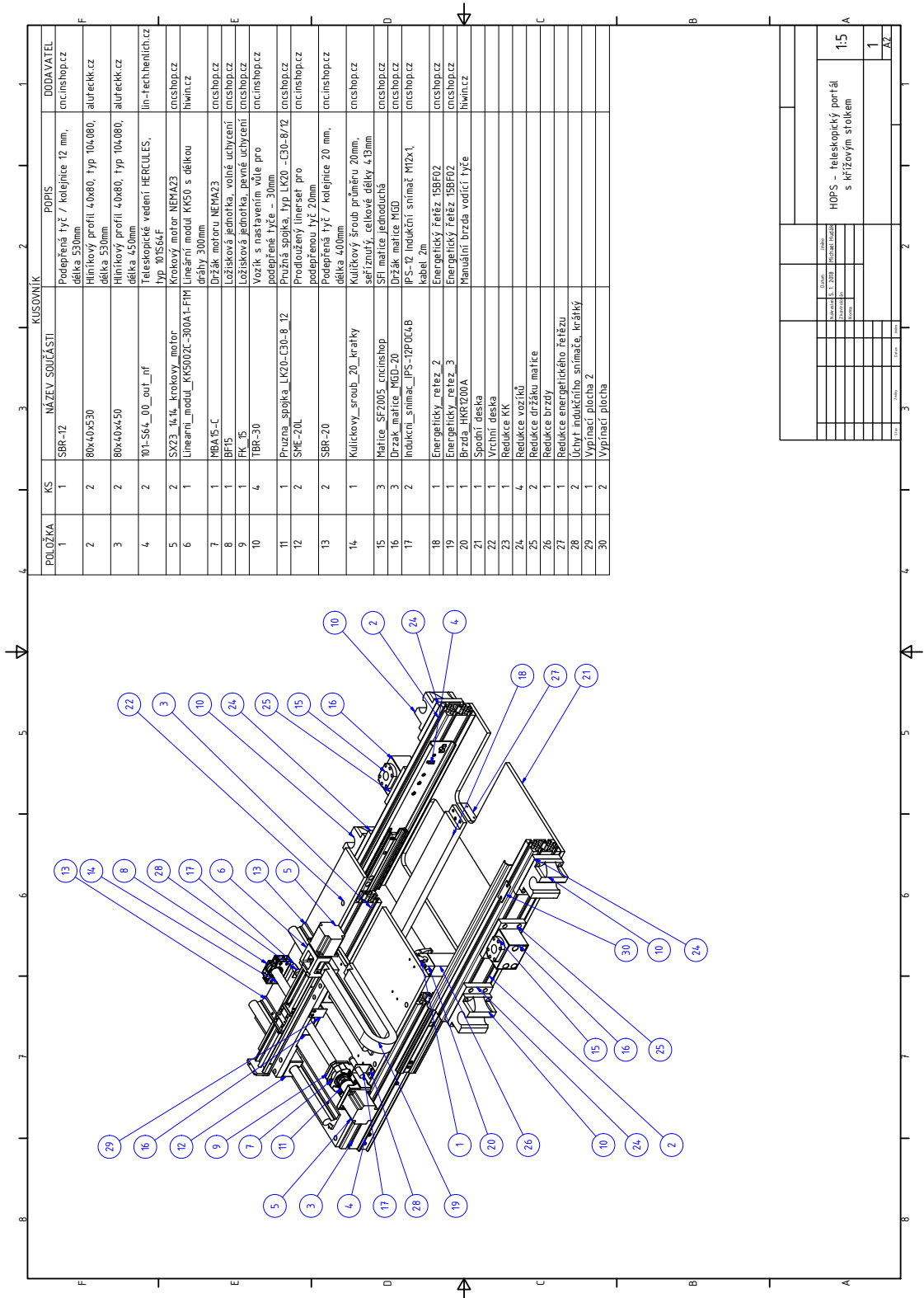
Obrázek 6.1: Krycí plech profilu



Obrázek 6.2: Ochranný kryt



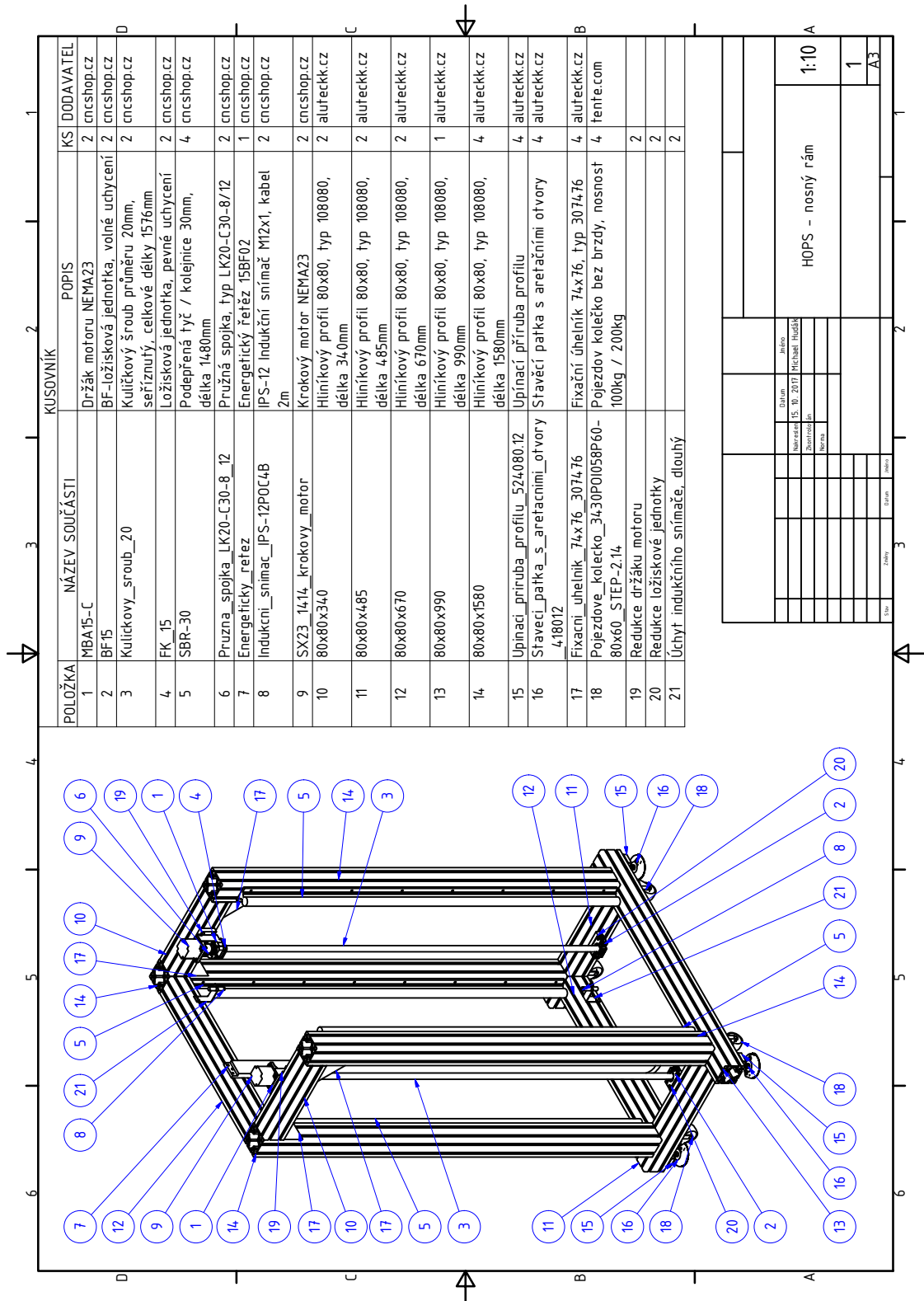
Obrázek 6.3: Přípravek pro utěsnění



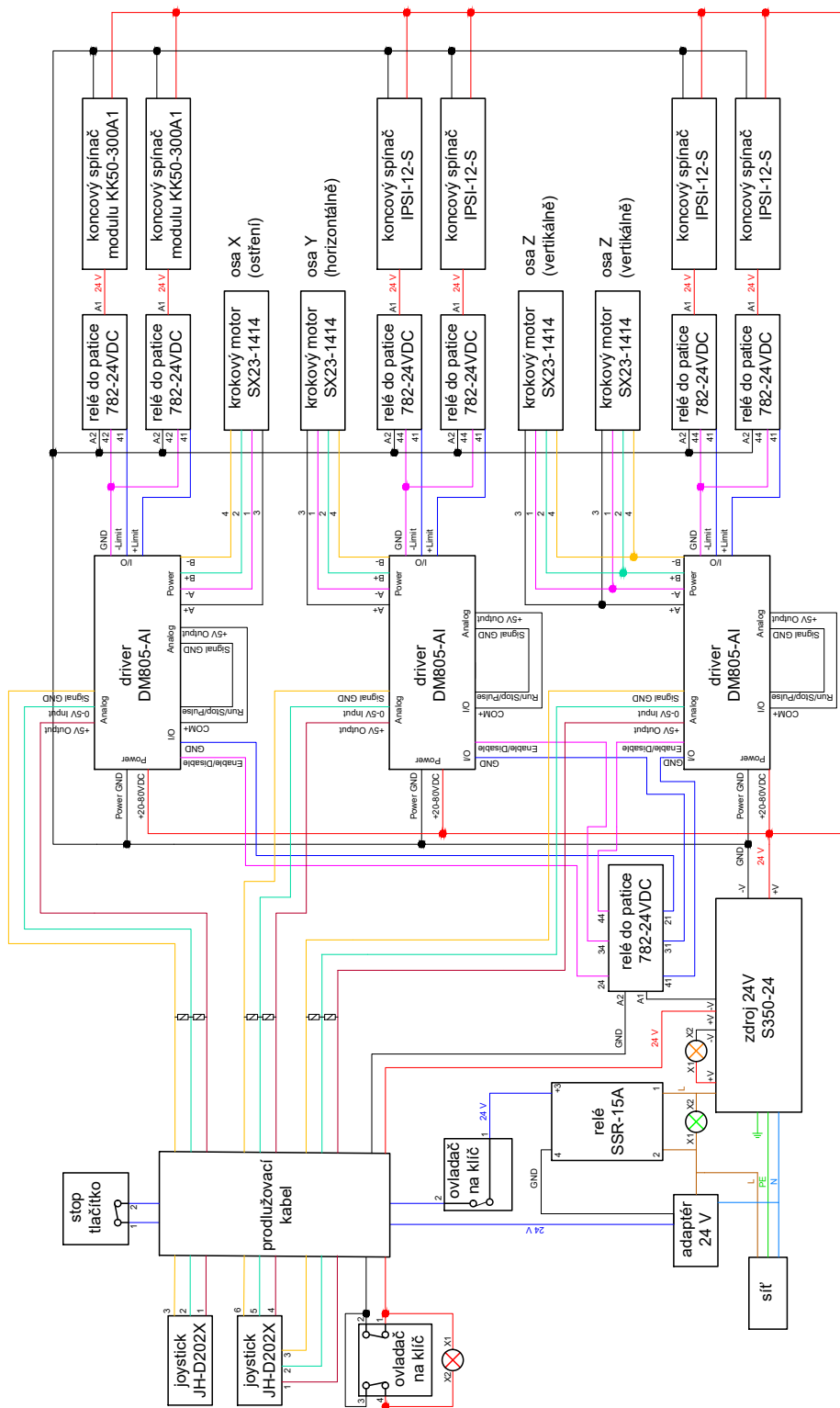
POLOŽKA	KS	NÁZEV SOUČÁSTI	KUSOVNÍK	POPIS	DODAVATEL
1	1	SBR-12		Podpěrná tyč / kolejničce 12 mm, délka 530mm	ancinshop.cz
2	2	80x40x50		Hliníkový profil 40x80, Typ 104080, délka 530mm	alureck.cz
3	2	80x40x450		Hliníkový profil 40x80, Typ 104080, délka 450mm	alureck.cz
4	2	101-S64_00_out_inf		Teleskopické vedení HERCULES, Typ 101S64F	lin-technik.cz
5	2	SK23 1414_Krokovy_motor		Krokový motor NEMA23	ancinshop.cz
6	1	Lineární_modul_KKS50ZL-300A1-FH		Lineární modul KKS50 s délkou dráhy 300mm	hwincz
7	1	MBA15-C		Držák motoru NEMA23	ancinshop.cz
8	1	BF-15		Ložisková jednotka, volně uchytení	ancinshop.cz
9	1	FK 15		Ložisková jednotka, pevně uchytení	ancinshop.cz
10	4	TBR-30		Vozík s nastavením vůle pro podpěrné tyče - 30mm	ancinshop.cz
11	1	Pruzna_spojka_LK20-C30-8_12		Pružná spojka, Typ LK20 -C30-8/12	ancinshop.cz
12	2	SME-20L		Prodloužený línaset pro podpěrnou tyč 20mm	ancinshop.cz
13	2	SBR-20		Podpěrná tyč / kolejničce 20 mm, délka 400mm	ancinshop.cz
14	1	Kuličkový_sroub_20_kratky		Kuličkový šroub průměru 20mm, seřizovací, celková délka 4,93mm	ancinshop.cz
15	3	Matice_SF2005_ancinshop		SPI matice jednoduše	ancinshop.cz
16	3	Držák_matice_HGD-20		SPI matice jednoduše	ancinshop.cz
17	2	Indukční_snímač_IPS-12P004,6		IPS-12 Indukční snímač MTZx1	ancinshop.cz
18	1	Energetický_retez_2		Energetický řezák 15BF02	ancinshop.cz
19	1	Energetický_retez_3		Energetický řezák 15BF02	ancinshop.cz
20	1	Brzda_HKR1700A		Manuální brzda vodící tyče	hwincz
21	1	Spodní_deska		Kabel 2m	
22	1	Vrchní_deska			
23	1	Redukce_KK			
24	4	Redukce_vozíků			
25	2	Redukce_držáku_matice			
26	1	Redukce_brzdy			
27	1	Redukce_energetického_řezáku			
28	2	Úchyt_indukčního_snímače_krátký			
29	1	Výpinnací_plocha_2			
30	2	Výpinnací_plocha			

1:5	HOPS - teleskopický portál s výsuvným stolem
1	AZ

Obrázek 6.4: Teleskopický portál s výsuvným stolem - HOPS



Obrázek 6.5: Vnější konstrukce zařízení - HOPS



Obrázek 6.6: Podrobné schéma elektronického zapojení - HOPS