



Diplomová práce

Přístroj pro vizualizaci povrchových vln na kapalinách v elektrickém poli

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

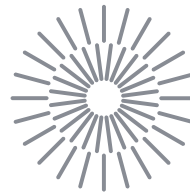
Bc. Ondřej Melich

Vedoucí práce:

Ing. Josef Skřivánek, Ph.D.

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Přístroj pro vizualizaci povrchových vln na kapalinách v elektrickém poli

Jméno a příjmení:

Bc. Ondřej Melich

Osobní číslo:

S22000239

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Zadávající katedra:

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši problematiky týkající se povrchu kapalin a vizualizace povrchu kapaliny a vibro-izolace přístrojů.
2. Navrhněte konstrukční varianty přístroje pro vizualizaci povrchových vln na kapalinách.
3. Konstrukčně zpracujte vybranou variantu zařízení a vypracujte výrobní dokumentaci.
4. Navrhněte vhodnou vibroizolaci zařízení.

<i>Rozsah grafických prací:</i>	10
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	40
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	čeština

Seznam odborné literatury:

1. PEŠÍK, Lubomír. Části strojů: stručný přehled. Díl 2 / Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita, 2005. ISBN 80-7083-608-3;
2. JULIŠ, K., BREPTA, R.: Mechanika I. díl. Statika a kinematika. Technický průvodce 65. SNTL Praha 1986; [3] BRÁT, V., ROSENBERG, J., JÁČ, V.: Kinematika. SNTL/ALFA Praha 1987;
3. LUKÁŠ, D. et al.: Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nano-scale technology of the twenty-first century) Textile Progress 41(2):59-140, June 2009, DOI: 10.1080/00405160902904641
4. CHAJDA, Radek. Zkoumáme kapaliny: návody na jednoduché pokusy, odvození a vysvětlení základních fyzikálních zákonů. Brno: Computer Press, 2009. Hravá věda. ISBN 978-80-251-2568-7.
5. NOŽIČKA, Jiří. *Mechanika tekutin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02865-8.
6. ONDARÇUHU, Thierry a Jean-Pierre AIMÉ, ed. *Nanoscale liquid interfaces: wetting, patterning, and force microscopy at the molecular scale*. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2013. ISBN 978-981-4316-45-3.

Vedoucí práce: Ing. Josef Skřivánek, Ph.D.
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Datum zadání práce: 21. listopadu 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 31. května 2025

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Skřivánkovi, Ph.D. za odborné rady a pečlivý dohled nad plněním všech povinností. Zároveň patří velké díky i panu doc. Ing. Pavlu Pokornému, Ph.D. za vynález nového principu měření, díky kterému vznikl nápad na tuto práci. Děkuji katedře mechaniky, pružnosti a pevnosti za odborné měření a propůjčení měřicí techniky. Zároveň děkuji katedře textilních a jednoúčelových strojů za poskytnutí zázemí pro tvorbu. V neposlední řadě patří díky všem, kteří přispěli k výsledkům této práce. Mé studium by se neobešlo bez podpory a motivace od rodiny a těch nejbližších.

Přístroj pro vizualizaci povrchových vln na kapalinách v elektrickém poli

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem nového laboratorního přístroje pro vizualizaci vln na kapalinách v elektrickém poli. Představuje nový bezkontaktní princip pro zobrazení změny povrchového napětí pomocí zdrojů elektromagnetického záření a soustavy zrcadel. Práce je zaměřena na problematiku povrchového napětí a vibroizolaci, jakožto nedílnou vlastností navrhovaného stroje. Obsahuje prvotní měření veškerých vibrací v místnosti provozu zařízení, návrh požadované vibroizolace a následné kontrolní měření za pomoci rázového kládívka jako důkaz funkčnosti návrhu. V práci je představen konstrukční návrh podpořený veškerými potřebnými výpočty a výkresovou dokumentací. V neposlední řadě obsahuje nezbytnou simulaci intenzity elektrického pole obou elektrod a úspěšnou finální zkoušku laboratorního zařízení.

Klíčová slova

Laboratorní přístroj, povrchové napětí, vibroizolace, intenzita elektrického pole

Device for visualizing the surface waves on a liquids in an electric field

ABSTRACT

The diploma thesis deals with a design of the new laboratory device for visualization of a waves on a liquids in an electric field. It introduces a new non-contact principle for displaying a surface voltage changes using an electromagnetic radiation sources and an array of mirrors. The work focuses on the issue of a surface tension and a vibration isolation as an integral feature of the proposed device. It includes an initial measurement of all the vibrations in the room of operation of the machine, the design of the required vibration isolation and subsequent control measurements using an impact hammer as proof of the functionality of the design. The thesis presents the structural design supported by all the necessary calculations and the drawings. Finally, it includes the necessary simulation of the electric field strength of the two electrodes and the successful final test of the laboratory device.

Key words

Laboratory device, surface tension, vibration isolation, electric field

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	TEORETICKÁ ČÁST	13
2.1	VÝROBA NANOVLÁKEN – METODY	14
2.1.1	METODA DLOUŽENÍ – DRAWING	14
2.1.2	ODSTŘEDIVÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ – FORCESPINNING	15
2.1.3	ZVLÁKŇOVÁNÍ HORKÝM VZDUCHEM – MELTBLOW	16
2.1.4	ELEKTROSTATICKE ZVLÁKŇOVÁNÍ	16
2.1.5	ZVLÁKŇOVACÍ ELEKTRODY	17
2.2	FYZIKÁLNÍ JEVY A INTERAKCE V ELEKTRICKÉM POLI.....	19
2.3	ELEKTRICKÝ TLAK A TAYLORŮV KUŽEL	20
2.4	TAYLORŮV KUŽEL.....	20
3	VIBRO-IZOLACE MECHANICKÉ STRUKTURY	22
3.1	MECHANICKÉ KMITÁNÍ.....	22
3.2	REZONANCE.....	23
3.3	METODIKA VÝPOČTŮ	24
3.4	ELIMINACE VIBRACÍ.....	24
3.4.1	PASIVNÍ TLUMÍCÍ PRVKY	26
3.4.2	AKTIVNÍ TLUMÍCÍ PRVKY.....	27
3.4.3	ROZDÍLY PASIVNÍCH A AKTIVNÍCH SYSTÉMŮ.....	28
4	PRAKTICKÁ ČÁST A CÍLE PRÁCE	30
4.1	PRINCIP A FUNKCE PŘÍSTROJE.....	30
4.2	FUNKČNÍ MODEL ZAŘÍZENÍ.....	31
5	NÁVRHY KONSTRUKČNÍCH VARIANT	33
5.1	KONCEPT STROJE 1 (ČERVENÁ).....	34
5.2	KONCEPT STROJE 2 (ZELENÁ)	35

5.3	KONCEPT STROJE 3 (MODRÁ).....	36
5.4	VÝBĚR VYHOVUJÍCÍHO KONCEPTU	37
6	NÁVRH VIBRO-IZOLACE PŘÍSTROJE	40
6.1	MĚŘENÍ ZRYCHLENÍ	41
6.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	43
6.2.1	PRACOVIŠTĚ BEZ VEŠKERÉ APARATURY	44
6.2.2	PODLAHA	45
6.2.3	STŮL SE ZÁVAŽÍM (80 kg)	46
6.3	ZÁVĚR Z MĚŘENÍ.....	46
6.4	SPECIFIKACE SILENTBLOKŮ	47
7	DIMENZOVÁNÍ KOMPONENTŮ.....	49
7.1	VODÍCÍ TYČE.....	49
7.2	AXIÁLNÍ KULIČKOVÉ LOŽISKO	51
7.3	ZÁVITOVÉ TYČE	52
7.4	DIALEKTRICKÁ PEVNOST	53
8	VÝROBA FUNKČNÍHO ZAŘÍZENÍ	54
8.1	SESTAVA LASERŮ	55
8.2	SESTAVA ZRCADEL	56
8.3	SESTAVA ELEKTRODY	56
8.4	SESTAVA ROZTOK	57
8.5	CELKOVÁ SESTAVA LABORATORNÍHO PŘÍSTROJE	58
9	NÁVRH STANICE LABORATORNÍHO STROJE	60
10	ROZLOŽENÍ INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE	62
10.1	NÁVRH ELEKTRODY A PODSTAVY	62
10.2	MATEMATICKÝ MODEL ELEKTRODY A PODSTAVY	63
10.3	VÝSLEDKY ANALÝZ	64

10.4	ANALÝZA INTENZITY EL. POLE PRO RŮZNÉ NAPĚTÍ	67
10.5	HODNOTA INTENZITY EL. POLE NA PODSTAVĚ	68
11	ZKOUŠKA LABORATORNÍHO STROJE	69
11.1	MĚŘENÍ VIBRACÍ STROJE	69
11.1.1	SNÍMAČ 1	71
11.1.2	SNÍMAČ 2	71
11.1.3	SNÍMAČ 3	72
11.2	ZOBRAZENÍ POVRCHU ROZTOKU	72
12	ZÁVĚR.....	75
	PŘÍLOHA 1	83
	PŘÍLOHA 2.1	84
	PŘÍLOHA 2.2	85
	PŘÍLOHA 2.3	86
	PŘÍLOHA 3 – HROTOVÁ ELEKTRODA	87
	PŘÍLOHA 4 – TALÍŘOVÁ ELEKTRODA	87
	PŘÍLOHA 5	88

1 ÚVOD

Vědecká a výzkumná komunita po celém světě hraje klíčovou roli ve zkoumání nových technologií a implementování inovací, které mohou pozitivně ovlivnit život nás všech. Profesori, výzkumní pracovníci ve vývojových a výzkumných centrech zauímají významné postavení v oblasti bádání, neboť jejich práce je často klíčovým motorem pro technologický pokrok. Nicméně, v rámci této významné role je někdy snadné zapomenout na některé základní principy a oblasti, které by mohly být rozhodující pro naše budoucí inovace.

V kontextu současných událostí lze konstatovat, že technologie nanovláknenné výroby představují jednu z oblastí, jejichž využití by mohlo mít zásadní dopad v mnoha odvětvích od biomedicíny, energetiky až po materiálový průmysl. Je však třeba zdůraznit, že i přes význam této technologie, mnozí vynálezci a výzkumníci zatím nedostatečně prozkoumali, co se vlastně na povrchu kapalin v průběhu nanovláknenné výroby děje.

Toto zdánlivé opomenutí nelze brát jako nedostatek zájmu ze strany těchto uznávaných odborníků. Je spíše důsledkem jejich nesmírné zaneprázdněnosti a zaměření na mnohé jiné aspekty jejich výzkumné práce. Počínaje časovým tlakem, ať už ze strany zákazníků, tak z akademické půdy. Je proto žádoucí a vhodné tuto situaci vnímat jako výzvu k lepšímu porozumění této problematice povrchového napětí v kapalinách a k zajištění, že se nanovláknenná výroba stane předmětem hlubšího zkoumání, které může mít širší společenský dopad.

Bez důkladného porozumění základním fyzikálním principům elektrického zvlákňování se příprava vhodných polymerních roztoků pro zvlákňování stává silně empirickou disciplínou, která se musí potýkat s mnohdy protichůdnými daty. Zájmem o hlubší porozumění jevů dějících se na hladině kapaliny vznikl nápad na tuto diplomovou práci. S touto výzvou přišel pan docent Ing. Pavel Pokorný, Ph.D. z Katedry netkaných textilií a nanovláknenných materiálů.

Navrhované zařízení má usnadnit zkoumání hladinových jevů v polymerních roztocích umístěných v silném elektrickém poli. Klasické metody selhávají v silném elektrickém poli mimo jiné i proto, že sonda vložená do tohoto pole jej silně ovlivňuje. Je vhodné použít přísně bezkontaktní, tedy optický přístup, který je netečný k elektrickému poli a naopak. Pro studium hladinových jevů se velmi dobře hodí změny odraženého laserového světla od povrchu zkoumané kapaliny v čase.

Předmětem této práce bude tedy konstrukce tohoto laboratorního přístroje na základě všech požadavků pana docenta Pokorného. Práce bude obsahovat nepostradatelnou simulaci intenzity elektrického pole v okolí elektrody a pozorované nádoby s kapalinou. Bude se zabývat problematikou povrchového napětí v kapalinách a také druhů vibroizolací. Poslední zmiňované téma úzce souvisí s funkčností a problémem přístroje. Izolace vůči vnějšímu buzení v podobě vibrací v tomto případě je nepostradatelná a nezbytná pro minimalizování nepříjemných vlivů otřesů, různých mechanických artefaktů a změn měřicí soustavy. Zároveň by měl stroj podstatně usnadnit zkoumání a také výrazně zlepšit opakovatelnost získaných výsledků.

2 TEORETICKÁ ČÁST

Nanovláknem je tenký materiál, jehož průměr se pohybuje pod hodnotou jednoho mikrometru (tisíckrát menší než lidský vlas). Připravuje se ze široké škály polymerů, polymerních směsí a ze směsí polymerů s nízkomolekulárními aditivami. Existuje řada přístupů, jak takového vlákna dosáhnout. Zpravidla jsou využívány různé fyzikální jevy k dosažení požadovaného průměru. Jedním z nejrozšířenějších přístupů je využití elektrostatického zvlákňování. Dnešní stroje disponují tvorbou celé vrstvy obsahující pouze nanovláknem. Takové vrstvy mají až extrémní vlastnosti a to jak mechanické, tak i chemické.[1–3]

Výroba nanovláken s použitím elektrostatického zvlákňování se stala velmi klíčovou metodou v oblasti moderního inženýrství a materiálového výzkumu. První patenty a počátky širšího bádání sahají až do počátků 20. století. O průmyslovém využití se začalo přemýšlet a zkoumat až v 80. letech minulého století. Země, které k tomuto „materiálu budoucnosti“ přispěly bylo USA, Čína a Japonsko. Další důležitou součástí historie nanovláken je Technická univerzita v Liberci. Ta přispěla patentem zvlákňování z volné hladiny a následným vývojem stroje, který je schopný průmyslové výroby. Tento výzkum dále pokračoval pod značkou NANOSPIDER, libereckou společností ELMARCO. Následoval masivní rozvoj po celém světě. [1–3]

Historie počátků myšlenky vyrobit vlákno takového průměru je datováno až do 17. století. Vědec William Gilbert už tenkrát pozoroval vznik a tvorbu Taylorova kužele na povrchu kapky tekutiny. [1–3]

Oblast použití neustále expanduje a možnost využití nanovláknenné vrstvy s takovými vlastnostmi zvažuje stále více odvětví, což naznačuje dynamický trend rozvoje v aplikaci této technologie. Díky nano průměru jsme schopni zaplnit vrstvu mnohonásobně více vláken než klasická textilní plátna a zvýšit tak hustotu. Mají jedinečný poměr povrchu k objemu a tím pádem extrémně malé póry ve vrstvách, které jsou předpokladem těžko dosažitelných tepelně izolačních vlastností. Využití v praxi tak mají v široké škále aplikací, počínaje biomedicíny (náhrada buněčné vrstvy, implantáty, nosiče různých aktivních látek, jako jsou katalyzátory), elektroniky, textilní průmysl, a hlavně filtrační jednotky. [1–3]

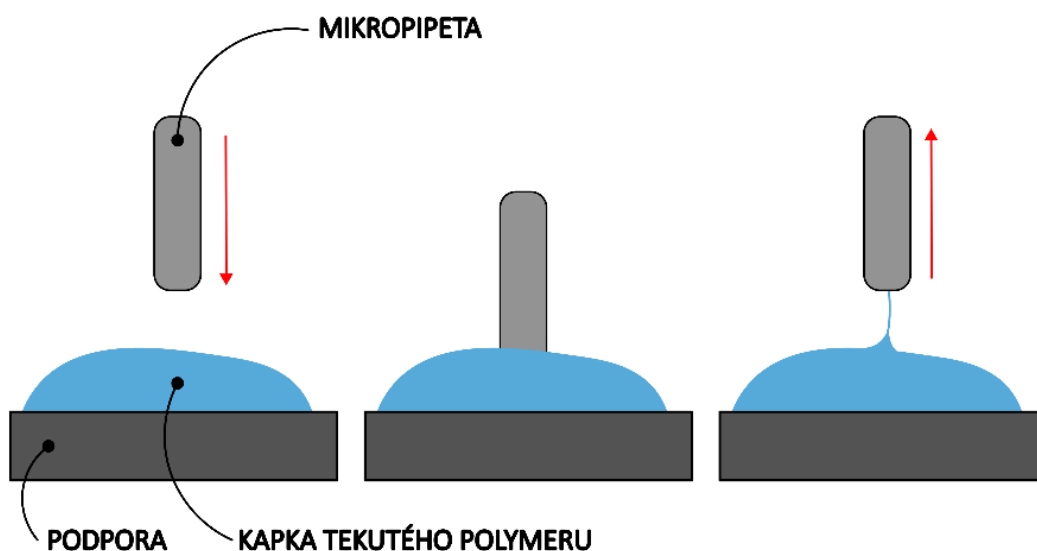
2.1 VÝROBA NANOVLÁKEN – METODY

Momentálně na trhu existuje mnoho metod na výrobu nanovláknenné struktury. Dělí se jak typem energie, jejím působením se hladina polymerního roztoku deformuje, typem elektrod, tak typem elektrického proudu (střídavý nebo stejnosměrný). Každý má své výhody i nevýhody a najde si svou oblast využití. Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, Technická univerzita v Liberci má na kontě vývoj bezkonkurenčního stroje s názvem NanospiderTM. Stroj je společným dílem profesora Oldřicha Jirsáka z Technické univerzity v Liberci a pana Ladislava Mareše (Elmarco). Tento stroj využívá střídavého proudu k tvorbě požadované struktury.

V následujících kapitolách budou popsány nejpoužívanější a zdaleka ne všechny metody na výrobu nanovláken všech typů.

2.1.1 METODA DLOUŽENÍ – DRAWING

Tvorba tenkých vláken z kapky tekutého polymeru prostřednictvím procesu dlužení, zvaného také "drawing", je klasickou metodou určenou ve většině případů pro laboratorní prostředí. Pomocí mikropipety se extrahují jednotlivá vlákna z polymerní kapky s využitím mechanické síly. Postup spočívá vnořením tenkého zvlákňovacího elementu do kapalného polymeru a následném vytažení s přesně definovanou rychlostí. To vede k extrakci malého množství polymeru o zvolené či předepsané délce, který je vlivem odpařování rozpouštědla transformován na tenké vlákno. Schéma naznačeno na obrázku níže (Obrázek 1). [4, 5]

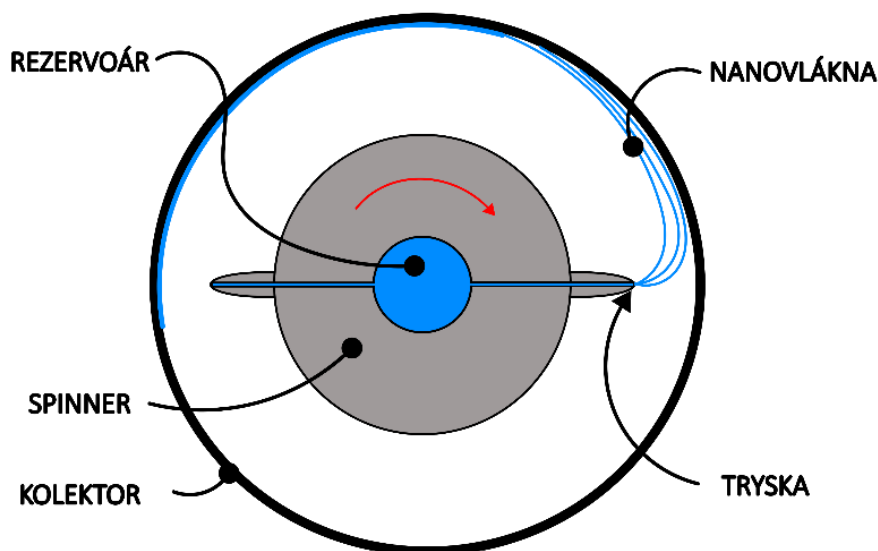


Obrázek 1 Metoda DRAWING [vlastní zpracování]

Díky kombinaci rychlosti vytahování a odpařování rozpouštědla se formuje extrémně jemné vlákno, jehož tloušťka je tedy závislá na zmíněných faktorech. Nicméně tato metoda, byť efektivní pro výrobu velmi dlouhých vláken, má svá omezení. Jedná se o nekontinuální proces, a proto není vhodný pro sériovou průmyslovou produkci. Další nevýhodou je absence možnosti řídit rozměry vláken. Využití nachází zejména v laboratorním prostředí, kde jsou využívána pro výzkumné účely a experimenty s materiály a polymery. [4, 5]

2.1.2 ODSTŘEDIVÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ – FORCESPINNING

Metoda odstředivého zvlákňování spočívá ve využití odstředivé síly k tvorbě nanovláken. Od počátku tohoto tisíciletí se stává konkurenční technologií s metodou zvlákňování elektrickou silou. Zařízení se skládá z rezervoáru, který obsahuje tekutý roztok polymeru. Tato nádržka je součástí zařízení zvaného spinnerety. Součástí se skládá z rotační hlavy, která se otáčí rychle kolem své osy. Z rezervoáru je roztok dopravován do trysky díky fyzikálním jevům, které při procesu nastávají. Schéma naznačeno na obrázku (Obrázek 2). [4, 5]



Obrázek 2 Metoda FORCESPINNING [vlastní zpracování]

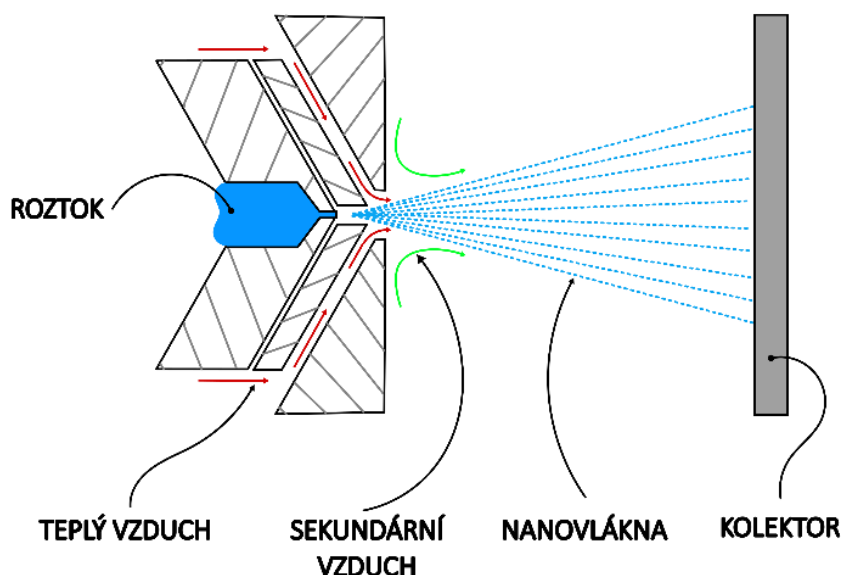
Při procesu nastávají 3 fáze. V první fázi nastává vstup polymerního roztoku do spinnerety. Další fázi začíná průchod roztoku do trysky. Otáčky spinnerety mají svou kritickou hodnotu, při které se začnou tvořit lineární útvary. Jakákoliv hodnota úhlové rychlosti nad zmiňovanou hodnotou kritickou zajistí tvorbu právě požadovaných vláken. V poslední fázi se formují

vlákna a nanáší se na kolektor umístěný kolem spinnerety. Proti pohybu částic polymerního roz-
toku působí odpor prostředí, turbulence vzduchu a smykové tření v trysce. Díky setrvačným
silám se vlákno protahuje do určité délky. [4, 5]

Nevýhoda této metody nastává při vysokých otáčkách, kdy je průměr vláken reduko-
ván a tím pádem mohou nastávat z důvodu nestabilního vlákna přetrhy a chyby v nánosu. [4, 5]

2.1.3 ZVLÁKŇOVÁNÍ HORKÝM VZDUCHEM – MELTBLOW

Technologie zvlákňování, která se nazývá Meltblown využívá energii, kterou jí předá
stlačený proudící horký vzduch. Ten urychlí taveninu, která proudí štěrbinou trysky a následně
je vrstva nanosená na kolektor. Proces vytváří nepřetržitou vláknitou strukturu. Bez použití spe-
ciálních přísad, či pojiv jsou získána vlákna bez žádného sekundárního zpracování. Schéma je
naznačeno na obrázku níže (Obrázek 3). [4, 5]

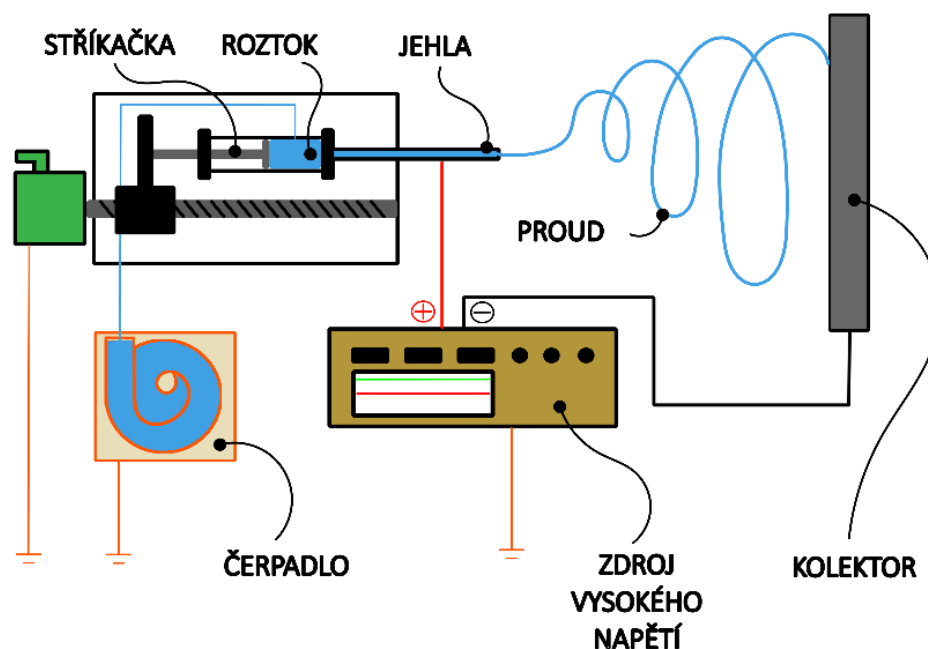


Obrázek 3 Metoda MELTBLOW [vlastní zpracování]

2.1.4 ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ

Elektrostatické zvlákňování, často používané pod termínem Elektrospinning je jednou
z nejrozšířenějších metod na výrobu nanovláknenné struktury. K tvorbě vláken o takovém prů-
měru využívá zařízení napájení stejnosměrného proudu a vysokého napětí. Elektroda, která je

v našem případě jehla, je napojena zpravidla na kladný potenciál. Záporný nebo nulový potenciál je připojen na kolektor, který vytvořená vlákna zachytává. Na této součásti bývá obvykle uchycena netkaná textilie, která je navinuta na dopravníku a tvoří podklad pod nanovláknennou strukturu. Schéma naznačeno na obrázku níže (Obrázek 4). [3–5]

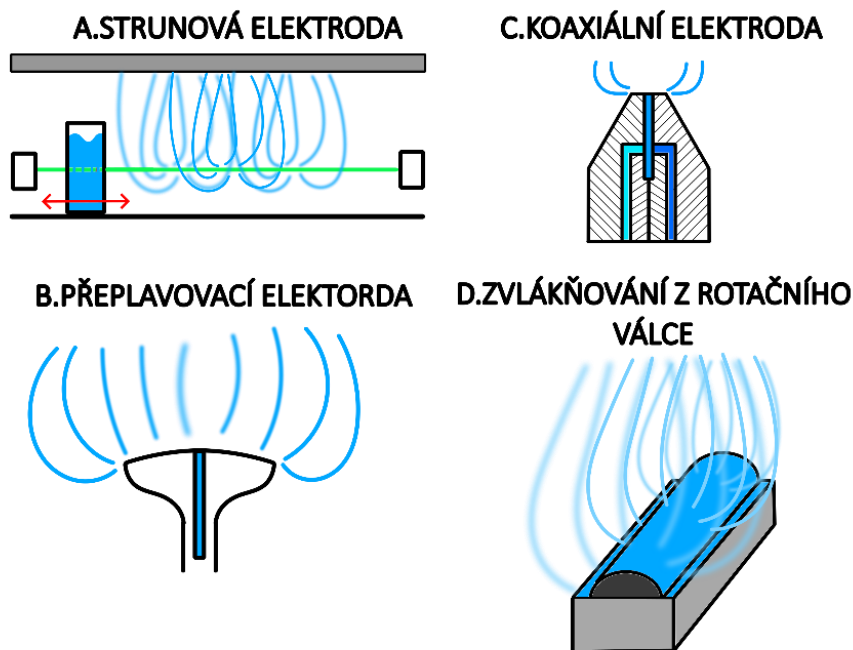


Obrázek 4 Metoda ELEKTROSPINNING [vlastní zpracování]

Proces je založen na potenciálovém rozdílu, který musí být na zvlákněvané kapalině. Tento polymerní roztok je vybuzen takzvanou nadkritickou hodnotou intenzity napětí elektrického pole. Taková hodnota způsobí zvýšení elektrického tlaku, který přesáhne hodnotu tlaku kapilárního a nastane jev zvaný Taylorův kužel (blíže popsán v kapitole 2.4). Následně dojde k hydrodynamické nestabilitě v podobě polymerních trysek.[3–5]

2.1.5 ZVLÁKNĚVACÍ ELEKTRODY

Elektroda je jedna z nejdůležitějších součástí elektrostatických zvlákněvacích strojů na výrobu nanovláken. Její tvar, materiál i poloha hrají významnou roli v kvalitě produkovaných vláken. V současné době dochází k rostoucímu počtu nových a stále přibývajících konstrukcí elektrod. Každý typ je určený pro jiný způsob výroby. Na obrázku níže (Obrázek 5) je naznačeno několik základních typů elektrod. [4–6]



Obrázek 5 Druhy elektrod, A – Strunová elektroda, B – zvlákňování z elektrody speciálního tvaru, C – Koaxiální elektroda, D – zvlákňování z rotačního válce [vlastní zpracování]

Obrázek 5-A představuje strunovou elektrodu. Elektroda je vyrobena z tenkého ocelového drátu, který je ustaven mezi dvě podpěry. Mezi těmito koncovými body jezdí vozík, ve kterém je uložen rezervoár s polymerním roztokem. Vratným přímočarým pohybem tak nanáší stále nový roztok na elektrodu, ze které jsou nanovlákná vytahována silou vysoké intenzity elektrického pole. Vysoký potenciál má mezi sebou struna a kolektor, který je uložen nad ní. Většinou se mezi nimi nachází netkaná textilie na dopravníku, která pohybem mezi zachytává nově vzniklá nanovlákná a formuje vrstvu. [4–6]

Na obrázku (Obrázek 5-B) je znázorněna speciální elektroda. Využívá svého tvaru a hran, kde se koncentruje nejvyšší intenzita elektrického pole. Díky tomu dojde v tomto místě k tvorbě vlákna. Většinou je tato elektroda použita v zařízení využívajícím střídavý proud. Tato metoda využívá tzv. **virtuální kolektor**, který spočívá v tom, že elektrické pole se střídavě vytváří mezi elektrodou a ionty vzduchu. V prostoru největšího gradientu elektrického pole směrem od zvlákňovací elektrody se shlukují úseky s opačným elektrickým nábojem, které reagují v závislosti na fázi zdroje s nově nabitými nanovlákná na elektrodě. Tento proces se stále opakuje a zvlákňování může probíhat teoreticky libovolně dlouho. [4–6]

Obrázek 5-C představuje koaxiální elektrodu. Polymerní hladina, také zvaná jako dvojhladina, přetéká přes elektricky nabitou hranu elektrody. V tomto místě dochází ke zvláknění z důvodu koncentrace vysoké intenzity elektrického pole, způsobené hranou a konstrukcí této elektrody. Dvojhladina se vytváří vytlačováním jádrového roztoku do hladiny vytvořené plášťovým roztokem. [4–6]

Na posledním obrázku (Obrázek 5-D) je naznačeno zvláknování z rotačního válce a tzv. volné hladiny. Tato elektroda kruhového průřezu je z části ponořena v polymerním roztoku. Postupným rotačním pohybem válce se kapalina nanáší na povrch a formuje vrstvu polymeru. Tato vrstva je následně působením elektrické síly zvlákněna v lineární útvary a je zachycena například na netkanou textilii uloženou na kolektoru. [4–6]

2.2 FYZIKÁLNÍ JEVY A INTERAKCE V ELEKTRICKÉM POLI

Při elektrostatickém zvláknování působí na hladinu polymerního roztoku, či taveniny elektrické pole. Toto pole je vytvořeno mezi dvěma náboji, které na sebe působí **intenzitou elektrického pole**. Takové pole je definováno, jako síla mezi náboji působící na jednotkový náboj:[7]

$$E = \frac{F}{q} = \frac{Q_1 \times Q_2}{4 \times \pi \times \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times a^2 \times q} = -grad \varphi \quad (2.2.1)$$

Je-li vektorové pole obecného potenciálu přítomné, nazýváme je potenciálními. Práci vykonanou přenesením bodového náboje Q [C] z bodu r_0 do obecného bodu r po křivce l je vypočítán: [7]

$$W_{r,r_0} = \int_l F \times dl \quad (2.2.2)$$

V rovnici (2.2.2) F představuje sílu, která musí být při přenesení náboje Q překonána. Práci lze definovat následovně: [7]

$$W_{r,r_0} = -Q \int_l E \times dl = Q \int_l grad \varphi \times dl \quad (2.2.3)$$

Dále z totálního diferenciálu potencionálu vyplývá: [7]

$$W_{r,r_0} = Q \int_l d\varphi = Q[\varphi(r) - \varphi(r_0)] \quad (2.2.4)$$

Práce tedy závisí na potencionálu koncových bodů dráhy l a nezávisí na jejím průběhu. Potenciál elektrostatického pole v daném bodě představuje potenciální energii vztaženou k jednotkovému náboji. [7]

$$\varphi(r) = - \int_{\infty}^r E \times dl \tag{2.2.5}$$
$$\varphi(r_2) - \varphi(r_1) = - \int_{\infty}^r E \times dl$$

Práci, kterou elektrostatické pole vykoná při přemístování bodového jednotkového, kladného náboje nazýváme **napětím** mezi těmito body: [7]

$$U_{12} = \int_{\infty}^r E \times dl = \varphi_1 - \varphi_2 \tag{2.2.6}$$

Napětí mezi dvěma elektricky nabitými body lze spočítat jako rozdíl obou potenciálů elektrického pole.

2.3 ELEKTRICKÝ TLAK A TAYLORŮV KUŽEL

Elektrický tlak a Taylorův kužel jsou fyzikální jevy, které jsou nedílnou součástí všech procesů elektrostatického zvlákňování a tvorbou lineárních útvarů zvaných nanovlákná. [5, 8, 9]

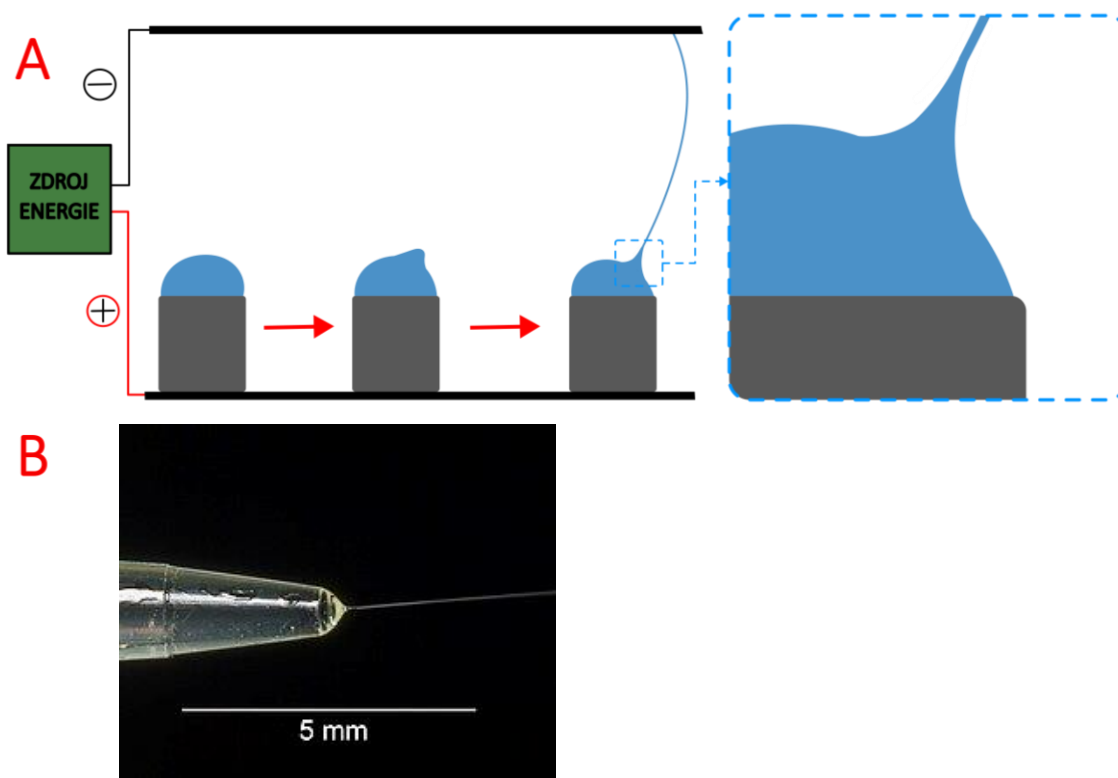
Elektrický tlak je síla, kterou lze nalézt na hladině elektricky nabitého polymerního roztoku. Je určena součinem velikosti náboje na povrchovém prvku a příspěvkem k celkové intenzitě elektrického pole. Teoretickou analýzu této problematiky provedl anglický fyzik, lord Rayleigh, který zkoumal, jakým způsobem se formuje celková intenzita elektrického pole v blízkosti dokonale vodivé a elektricky nabitě kapky. [5, 8, 9]

Taylor společně s Rayleighem dokázali, že kapky se vlivem elektrických sil deformují do tvaru sféroidu. Pro poměr hlavní a vedlejší osy tohoto geometrického útvaru byla určena kritická hodnota, při jejíž překročení se zkoumaná kapka rozpadla na dceřiné kapičky. [5, 8, 9]

2.4 TAYLORŮV KUŽEL

Taylor při pokusech na laboratorním zařízení fungujícího na podobném principu, jako dnešní elektrostatické zvlákňování pozoroval, že se při sepnutí a následném zvýšení napětí na

kapalině začal tvořit tzv. meniskus. Ten vznikne, pokud je kapalina vystavena elektrickému poli a její povrch se deformuje. Tento tvar začne při procesu nabývat konvexního (vypuklého) tvaru a těsně před prodloužením v tenké vlákno získá tvar téměř dokonalého kužele (Obrázek 6). Tento geometrický útvar se nazývá **Taylorův kužel**. Jeho polovina vrcholového úhlu má přibližně $49,3^\circ$. Konec kužele osciluje a na jeho vrcholu se objeví úzká kapalinová tryska, která se dluží a tvoří tak lineární útvar zvaný nanovláknko. [5, 8, 9]



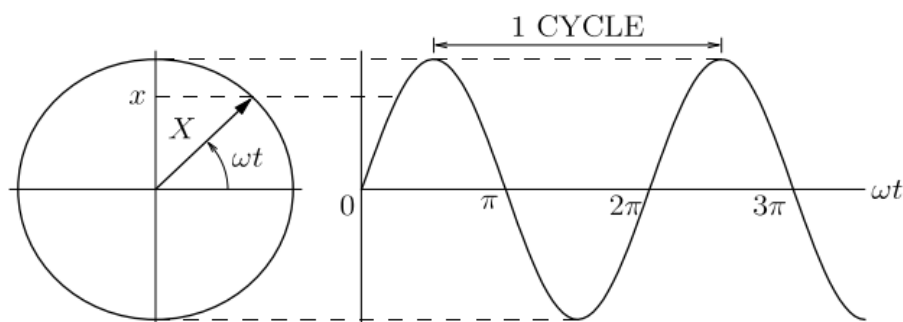
Obrázek 6 A) Tvorba TAYLOROVA kužele [vlastní zpracování],
B) Detail Taylorova kužele [10]

3 VIBRO-IZOLACE MECHANICKÉ STRUKTURY

Hlavní vlastností navrhovaného zařízení je schopnost odizolovat vnější vibrace. Je nezbytné potlačit přenos do vizualizačního systému a navrhnout takový vibroizolační systém, který bude jednoduchý na ovládání, finančně, a hlavně rozměrově přijatelný. V následujících kapitolách bude probrána základní teorie mechanického kmitání, které je klíčové pro návrh vibroizolace.

3.1 MECHANICKÉ KMITÁNÍ

Mechanické kmitání představuje periodickou oscilaci či pohyby hmotných objektů nebo hmoty kolem své rovnovážné polohy. V rovnovážné poloze je bod ve statické rovnováze. Vlnění probíhá pomocí vazebných sil, kterými na sebe navzájem působí částice látkového prostředí. Pravidelným periodickým vychýlením tělesa ze statické rovnováhy je vyvoláno tzv. harmonické kmitání. Hodnoty výchylky v tomto vlnění závislé na čase, odpovídají průběhu sinusové funkce viz Obrázek 7 . [10, 11]



Obrázek 7 Harmonický pohyb [9]

Na obrázku oblast označená popiskem „1 CYCLE“ se nazývá doba kmitu (perioda) T [s] a ta odpovídá času mezi dvěma po sobě jdoucími maximálními výchylkami. Počet kmitů harmonického děje za sekundu nazýváme kmitočet f [s⁻¹] a je dán vztahem: [11, 12]

$$\omega = 2 \times \pi \times f = \frac{2 \times \pi}{T} \quad [\text{s}^{-1}; \text{Hz}] \quad (3.1.1)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2 \times \pi} \quad [\text{s}^{-1}; \text{Hz}] \quad (3.1.2)$$

Každý fyzicky hmotný objekt na světě má svou charakteristickou vlastní frekvenci vibrací. Hodnota těchto frekvencí se nazývá **vlastní frekvence Ω** . Při zanedbání ztrát je změna

kinetické rovna potencionální, tzn. těleso setrvá ve vlnění, aniž by mu bylo potřeba dodávat vnější energii. Počet těchto frekvencí hmotného bodu závisí na stupních volnosti v prostoru. Získání a analýza těchto hodnot má zásadní význam v praxi nejen pro zajištění bezpečnosti zkoumané součásti, ale také pro ochranu okolního prostředí. Matematicky je vlastní frekvence závislá jen na tuhosti tělesa a hmotnosti. [11, 12]

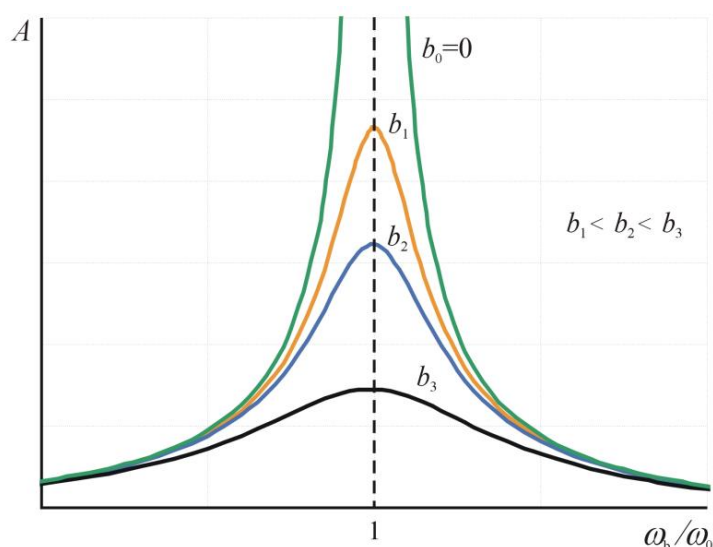
$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [\text{s}^{-1}; \text{Hz}] \quad (3.1.3)$$

Jeden z klíčových důvodů je predikce a prevence nežádoucích vibrací. Ty mohou mít značný vliv na výkon strojů a celkovou spolehlivost konstrukce. Analýza vibrací je nedílnou součástí návrhu a optimalizace konstrukcí. Umožňují konstruktérům součásti naddimenzovat takovým způsobem, aby nedocházelo například k jevu zvanému **rezonance**. [11, 12]

3.2 REZONANCE

Dle vlivu buzení lze kmitání rozdělit na volné, vlastní a vynucené. Volné kmitání je oscilace soustavy bez působení jakýkoliv vnější síly, tj. po vychýlení z rovnovážného stavu je ponechána v pohybu. Vlastní kmitání je vlnění soustav, bez působení vnějšího buzení. Vynucené kmitání je takové kmitání, které je ovlivněno buzením.

Buzení může být způsobeno mnoha vlivy, jako jsou například rotující nevyváženost součásti (periodicky proměnného pohybu kola či kotouče), relativním pohybem základu (jízda automobilu, letadla, lodí, ...), použitím pružiny, nebo také působením vnější síly na těleso. Účinkem působením této vnější síly vznikne v tělese napětí. Pokud je deformace nízká, vznikne pouze deformace pružná a těleso se začne chovat jako pružina. Po odlehčení silou tak bude mít snahu se dostat do původního tvaru a rozkmitá se kolem svého rovnovážného stavu. [12]



Obrázek 8 Závislost amplitudy na součiniteli naladění [10]

Je-li budící vnější frekvence síly shodná s jednou z hodnot vlastních frekvencí součásti, nastane jev zvaný **rezonance**. Při tomto jevu dochází k prudkému zvýšení amplitudy (viz Obrázek 8). Pro matematický popis tohoto jevu je nutné definovat potřebné veličiny jako je součinitel naladění η : [12]

$$\eta = \frac{\omega_R}{\Omega} \quad (3.2.1)$$

Určuje poměr mezi budící frekvencí ω a vlastní frekvencí Ω . Dalším parametrem je součinitel kritického tlumení b_{KR} : [12]

$$b_{KR} = 2 \times \sqrt{k \times m} \quad (3.2.2)$$

Poměrný útlum ζ je poslední vzorec, který potřebujeme:[12]

$$\zeta = \frac{b}{b_{KR}} \quad (3.2.3)$$

3.3 METODIKA VÝPOČTŮ

Lineární soustavy se soustřednými parametry se vyznačují prvky jako je hmotný bod, nebo tuhá hmotná tělesa (nositelky kinetické energie). Dále nehmotnými pružinami (nositelka potenciální energie) a tlumiči (mění mechanickou energii na teplo). Kombinací těchto prvků jsou vytvářeny výpočtové modely. Jednou z variant je diskretizace součásti soustředěním hmotnosti kontinua do vhodně zvolených míst a tyto hmotné body svázat nehmotnými pružinami a tlumiči. Další možností je použití metody konečných prvků, která počítá s obyčejnými lineárními diferenciálními rovnicemi. [11]

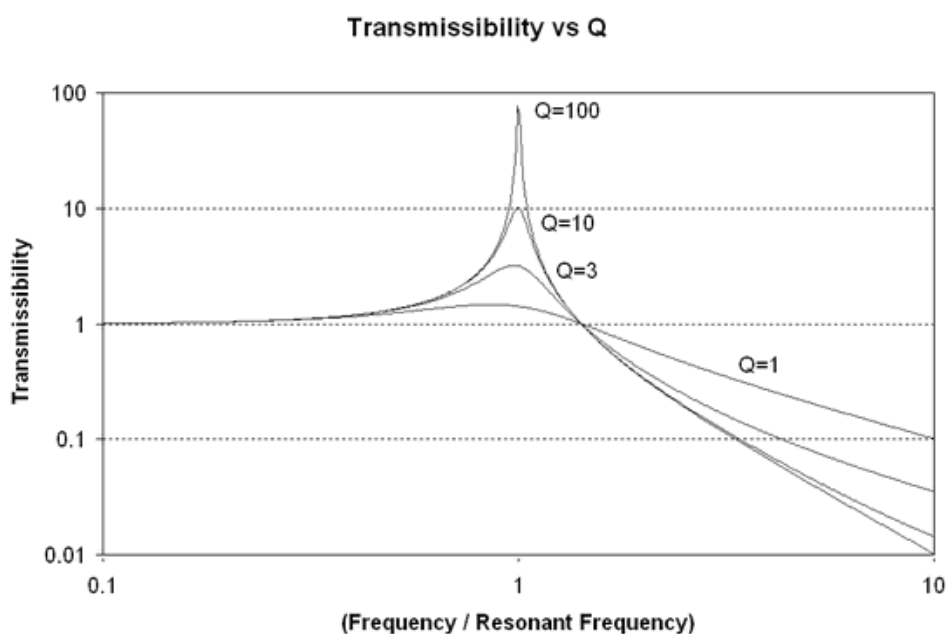
Odezva zmiňovaných soustav je závislá lineárně na buzení a pro výsledný pohyb platí princip superpozice. [11]

3.4 ELIMINACE VIBRACÍ

Vibroizolace v konstrukci představuje klíčový aspekt v systémech, kde se projevuje významné mechanické kmitání. Implementace vibroizolačního systému umožňuje dva přístupy. Prvním se snažíme eliminovat vibrace zařízením vytvořené, aby se nepřenášely do zá-

kladu a nešířily se tak dále. Druhým přístupem se naopak snažíme izolovat stroj od všech vnějších vibrací. Tato práce se zaměřuje na druhou variantu, a to konkrétně na oddělení přístroje od okolního prostředí. [11, 13]

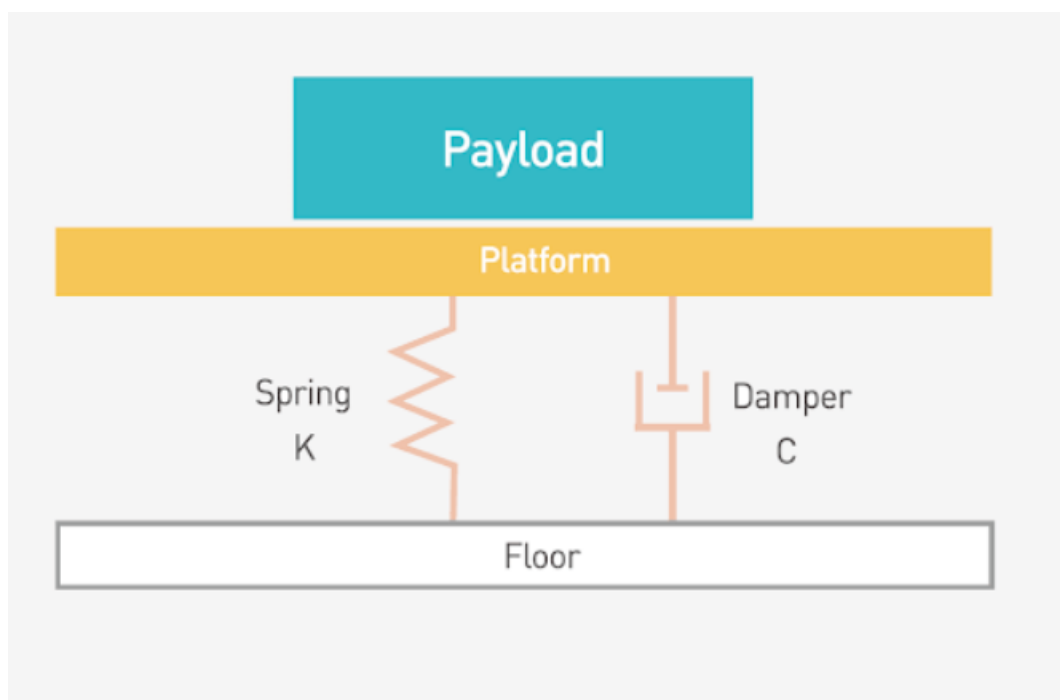
Z hlediska křivky transmisivity, což je poměr vibrací izolovaného povrchu k vibracím stroje závislý na frekvenci, se snažíme vibrace co nejvíce omezit. Na obrázku níže (Obrázek 9) vidíme amplitudo-frekvenční charakteristiku pasivního izolačního systému. Na vodorovné ose se nachází součinitel naladění (poměr budící frekvence vůči vlastní frekvenci) a rezonance nastává v hodnotě 1 (frekvence se rovnají). Pod touto hodnotou se propustnost systému pohybuje kolem hodnoty 1. Tato hodnota naznačuje, že sestavou prochází vibrace, aniž by byly zesíleny nebo sníženy. V rezonanční oblasti (tj. kolem hodnoty součinitele naladění 1) se všechny příchozí vibrace zesilují. Nad touto oblastí lze přenášet jen malé množství energie a křivka pomalu klesá. V grafu lze též nalézt i různé hodnoty poměrného útlumu ζ , označeného v tomto případě Q . Systém lze považovat za dolnoproustný filtr vibrací. [10–12]



Obrázek 9 Transmisivita závislá na frekvenci [12]

Vibroizolace lze klasifikovat dle několika kritérií, která charakterizují nutnost a přítomnost přídatných prvků z hlediska ovladatelnosti. Izolovat vlnění je možno pasivně neživým prvkem, nebo aktivním prvkem. [11, 13]

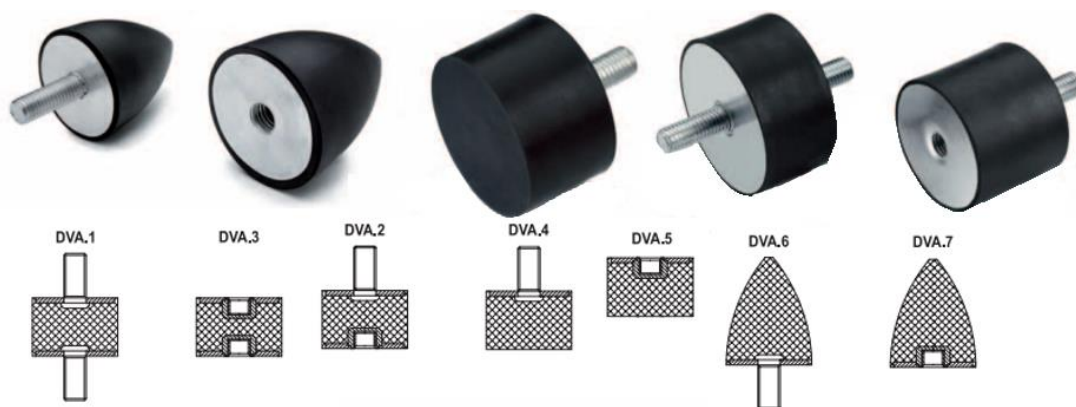
3.4.1 PASIVNÍ TLUMÍCÍ PRVKY



Obrázek 10 Schéma pasivního tlumení vibrací [13]

Pasivním prvkem na eliminaci vibrací v systému je myšleno přidání neaktivního členu do sestavy. Jeho hlavním účelem je absorpce, izolace vibrací a snížení kmitání. Absorpce kmitání probíhá přeměnou kinetické energie (energie pohybová) na jiné formy energie. Část energie se může přeměnit na energii tepelnou vlivem tření molekul uvnitř tlumiče, nebo na energii deformační v důsledku naakumulování elastické deformace. Izolační důvod využití je oddělení pozorovaného systému od zdroje, který tyto vibrace generuje, aby se nepřenášely dále. Snížení kmitání je většinou provedeno přidáním pružiny s určitou tuhostí. Názorné schéma systému je zobrazena na obrázku (Obrázek 10). [14–16]

Materiály, které se na tlumiče používají jsou většinou pryže, polyuretan, pružiny, nebo tlumící bloky také zvané jako **silentbloky**. Příklady konstrukčního zpracování těchto tlumících elementů na následujícím obrázku (Obrázek 11).[14–16]

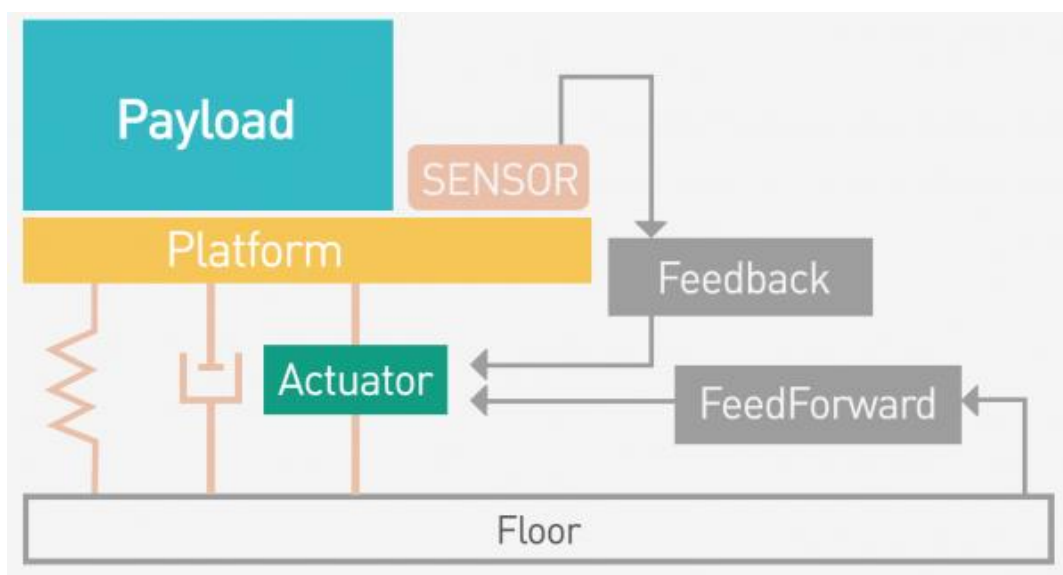


Obrázek 11 Příklady konstrukce silentbloků [16]

Tato varianta je většinou nejlevnější a výborně tlumí vysokofrekvenční vibrace. Nevýhodou je jejich delší ustálení a nemožné ovládání. [14–16]

3.4.2 AKTIVNÍ TLUMÍCÍ PRVKY

Aktivní systémy izolace vibrací obsahují krom pružin a tlumičů zpětnovazební i dopřednou smyčku. Zpětnovazební smyčka se ve většině případů skládá ze senzoru zrychlení (běžně používaným je piezoelektrický akcelerometr, který funguje na principu měření náboje, který je přímo úměrný mechanickému namáhání, které vzniká při zrychlení), řídicí jednotky (přijme signál od senzorů a na základě jeho hodnoty vyšle signál, který upraví patřičně své parametry, aby odpovídaly požadované eliminaci vibrací) a akčního členu. [15–17]



Obrázek 12 Schéma aktivní izolace vibrací [17]

Proces izolace probíhá tak, že signál (feedback) zrychlení od zmiňovaného senzoru je zpracován řídicí jednotkou. Následně je tento signál zesílen zesilovačem a poslán do akčního členu. Akční člen může být například elektromagnetický (actuator). Na základě zpracovaného signálu upraví elektromagnetické pole a provede zatlumení systému. Řídicí systém s dopřednou smyčkou (feedforward) a řízením, může dále měřit vnější vibrace a tyto hodnoty zároveň využívat pro vstupy do regulátoru. Ukázka schématu podobného případu je zobrazena výše (Obrázek 12). [15–17]

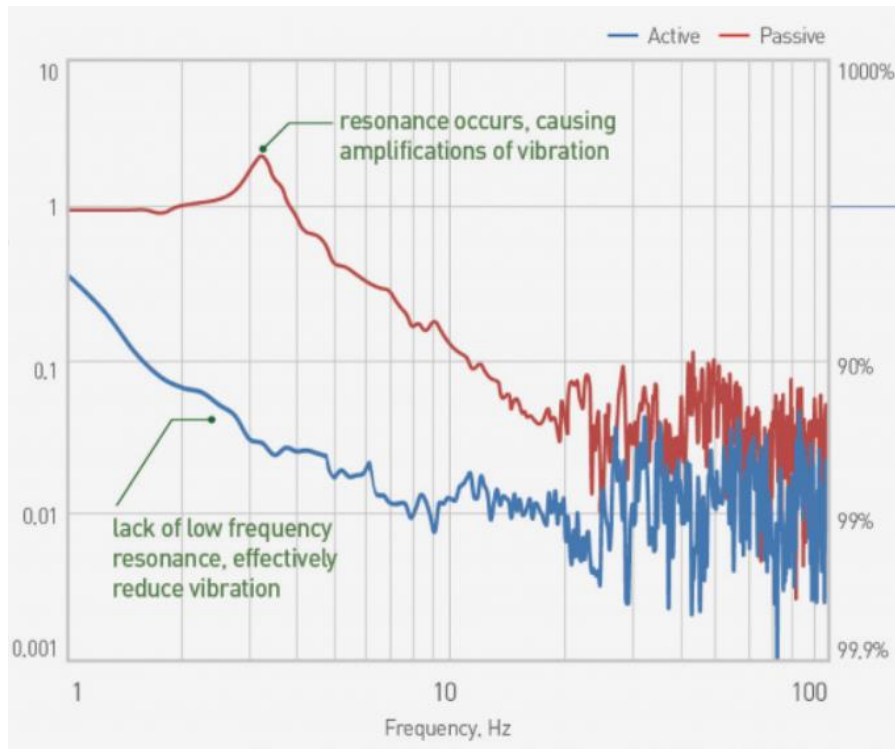
Frekvenční využití je z velké části pro nízké hodnoty frekvencí. Tím překonávají slabinu pasivních tlumících prvků systémů a účinně snižují nízkofrekvenční vibrace. U dokonalých aktivních systémů lze snižovat vibrace už od 0,5 Hz a dosáhnout až 90% izolace vibrací při 2 Hz. K rezonanční oblasti se tak systém nemá šanci ani přiblížit. [15–17]

3.4.3 ROZDÍLY PASIVNÍCH A AKTIVNÍCH SYSTÉMŮ

V rámci konstrukčního provedení (obě varianty nabízí rozdílné) jednotlivých systémů je možné pozorovat výrazné difference ve schopnostech tlumení. Důležitým faktorem při porovnání těchto systémů je i jejich finanční stránka. Pořizovací cena aktivního tlumení je řádově ve vyšších částkách než pasivní. Zjištěná skutečnost vyžaduje ekonomickou bilanci, kde je nutné zejména zohlednit náklady a jednotlivé přínosy před výběrem. Na druhou stranu je nutné zdůraznit fakt, že i přes vyšší pořizovací náklady mohou aktivní tlumiče poskytovat výrazně lepší účinnost v tlumení vibrací. [15–17]

S ohledem na řízení a prvotního naprogramování jsou pasivní tlumiče obecně považovány za jednodušší. Nedostatek potřeby řízení a programování při uvedení pasivního prvku do systému může být výhodou z hlediska nákladů na implementaci a údržbu. Při výběru a použití pasivního tlumiče není možné měnit, či optimalizovat jeho vlastnosti (tuhost). Je tedy žádoucí přesnou hodnotu tuhosti vypočítat analyticky, nebo vyjít z měření vibrací lokálně na místě za stejných podmínek, v jakých bude používán. [15–17]

Na obrázku (Obrázek 13) lze tyto rozdíly pozorovat. Na grafu na vertikální ose je závislost odchylky aktuální a odchylky statické. Na horizontální ose je uvedena v logaritmicím měřítku frekvence [Hz]. Z grafu vyplývá, že při aktivním systému tlumení nedochází v rezonanční oblasti k žádné výrazné odchylce oproti tomu pasivnímu. Ve vyšších hodnotách frekvence už je odezva shodná. [15–17]



Obrázek 13 Rozdíl mezi pasivním a aktivním tlumením [17]

4 PRAKTICKÁ ČÁST A CÍLE PRÁCE

V úvodní části této diplomové práce byl definován hlavní předmět a výstup, kterým je návrh a konstrukce laboratorního zařízení pro vizualizaci povrchových vln na kapalinách v elektrickém poli.

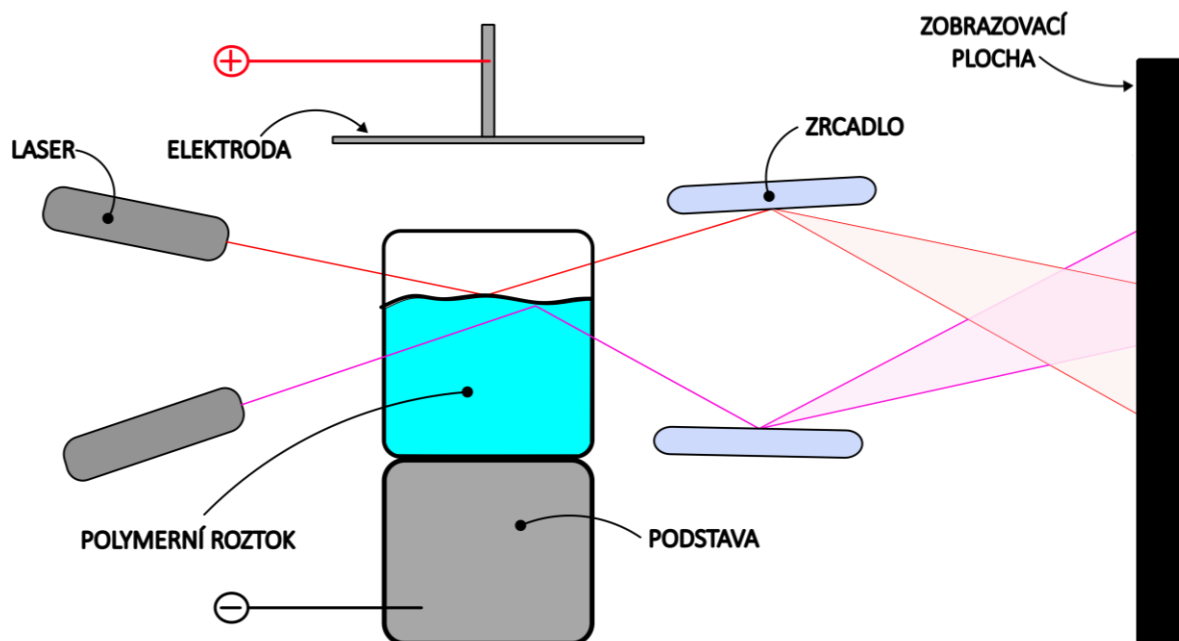
Před samotným návrhem, designem a nákupem všech potřebných komponentů byl zkoncipován a zaveden princip/funkce měření, který má být nový navržený přístroj schopen provádět. Tento inovativní princip byl vyzkoušen na provizorním funkčním modelu, kde byla zajištěna funkčnost a proveditelnost testů.

4.1 PRINCIP A FUNKCE PŘÍSTROJE

Mezi základní komponenty celkové sestavy patří **elektroda, podstava a zobrazovací plocha**. Na podstavě se nachází nádobka s polymerním roztokem (podstava má být dle požadků uchycena v revolverové hlavě pro rychlou výměnu zkoumaného roztoku). Jelikož je hlavním předmětem hladina ovlivněná elektrickým polem, byl zaveden na elektrodu a podstavu (oba komponenty jsou z vodivých materiálů) zdroj napětí. Konkrétně stejnosměrné napětí s kladným potenciálem na elektrodě a záporným na podstavě.

Pro minimalizaci interference povrchu polymerního roztoku s vnějším buzením, bude zařízení pozorovat hladinu a povrchové vlny pomocí sofistikované, **bezdotykové metody**. Tato inovativní metoda zahrnuje využití dvou zdrojů elektromagnetického záření (laserů), jejichž paprsky světla jsou směřovány přímo na hladinu roztoku. Z této hladiny se odráží a postupují na zrcadlo. Zrcadlo lze nastavit do speciální polohy, která byla navržena s ohledem na optimální polohu a úhel odrazu. Paprsky dále pokračují na určitou vzdálenost na plátno/zeď. Flexibilita v nastavení vzdálenosti zrcadla od plátna umožňuje jednoduché a přesné doladění zvětšeného výsledného obrazu podle potřeby.

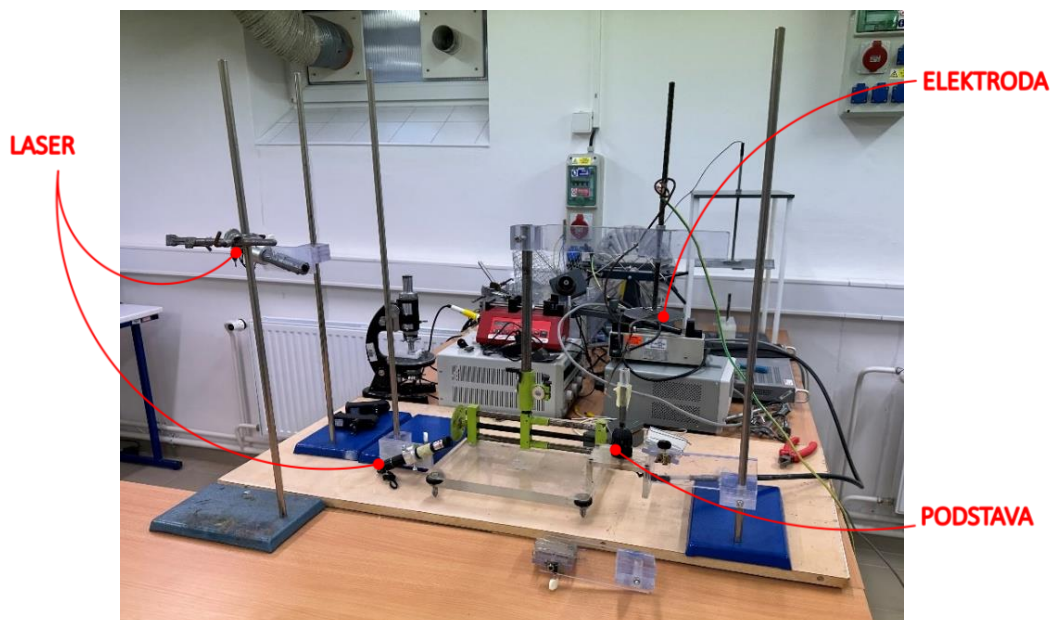
Soustava je v interakci s elektrostatickým polem, jehož intenzita začne působit v okolí nádoby s polymerním roztokem na jeho hladinu a začne ji destabilizovat. Tato nerovnováha v povrchových napětích jednotlivých vln umožňuje pozorovat přesné pohyby a interakce na odraze na zobrazovací ploše. Ucelený proces je naznačen na schématu na obrázku níže (Obrázek 14).



Obrázek 14 Schéma funkce laboratorního přístroje [vlastní zpracování]

4.2 FUNKČNÍ MODEL ZAŘÍZENÍ

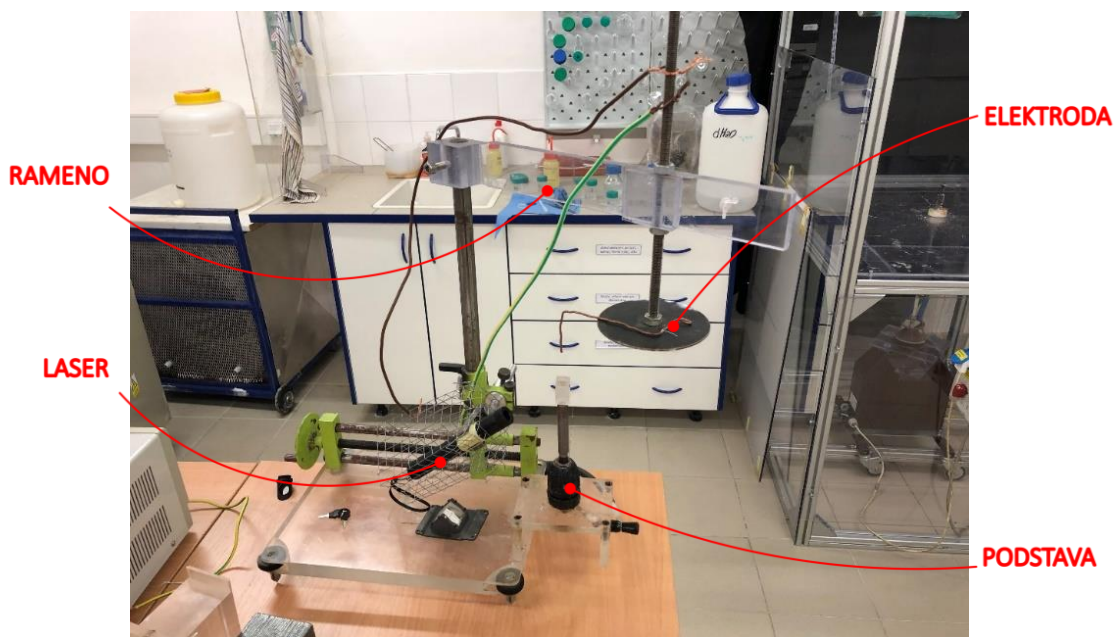
Na obrázcích níže (Obrázek 15 a Obrázek 16) je znázorněn první funkční model určený pro měření polymerní hladiny, který byl navržen a zkonstruován pro verifikaci teoretických předpokladů metodiky měření.



Obrázek 15 Funkční model přístroje pro vizualizace povrchových vln v kapalinách [vlastní archiv autora]

Funkční model a jeho jednotlivé dílce byly poskládány a sestaveny bez dostatečného předběžného plánování a systematického postupu. V první etapě vývoje nebyl kladen důraz na tuhost a přesnost přístroje.


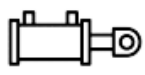




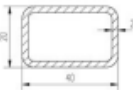





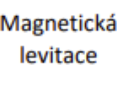

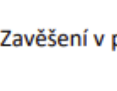
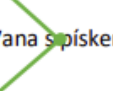


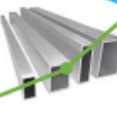





Ověření provozu funkčního modelu a zkoumání hladiny polymerního roztoku byl **úspěšný**. Při optimálním nastavení jednotlivých komponentů byly na zobrazovací ploše (v tomto případě zdi) vidět jednotlivé vlnky a to nejdůležitější, interakce s elektrickým polem. Na základě pozitivních výsledků tak mohl začít návrh a nakupování dílců pro reálný přístroj.



Obrázek 16 Funkční model ramena přístroje pro vizualizace povrchových vln v kapalinách [vlastní archiv autora]

5 NÁVRHY KONSTRUKČNÍCH VARIANT

Pro neefektivnější návrh konceptů byla zvolena kreativní metoda generování návrhů pomocí Morfologické matice (Obrázek 17), která „systematicky identifikuje všechny možnosti řešení problému přes jednotlivé atributy a spojuje je do různých kombinací pro vznik ideálního řešení“ [18]. Pokrývá jednotlivé funkce a podestavy, které laboratorní přístroj musí zajistit. Prostřednictvím pospojování nápadů do rozdělených logických celků byly následně navrženy všechny možné a relevantní možnosti řešení. Jejich klady a zápory budou popsány v následujících kapitolách.

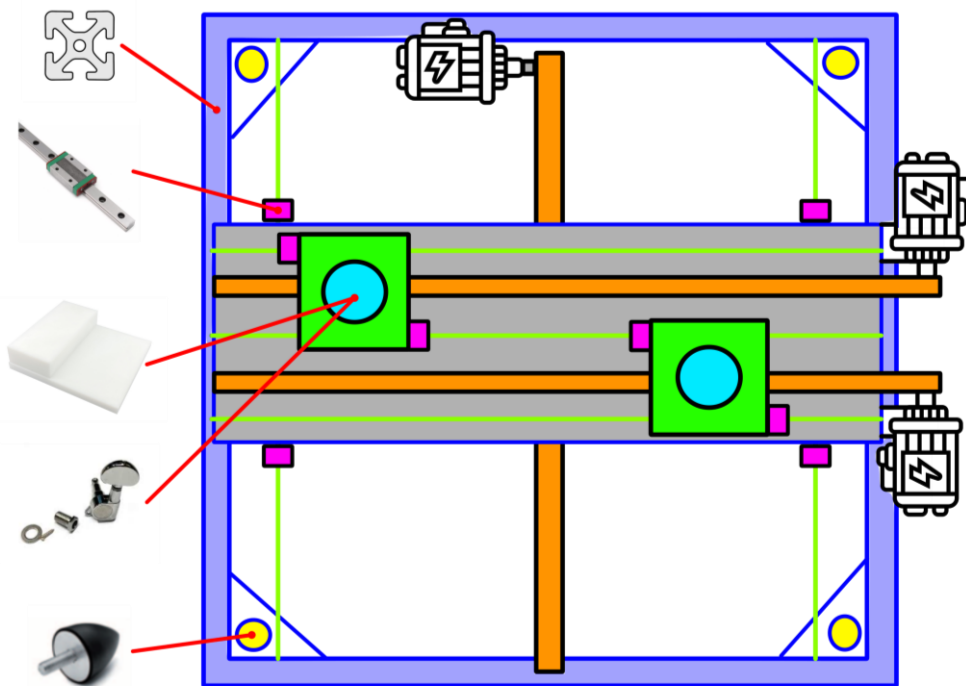
FUNKCE	MOŽNOSTI ŘEŠENÍ			
POHON	 Elektromotor	 Pneumatický pohon	 Hydraulický pohon	 Mechanický
RÁM	 Hliníkový profil	 Dřevo-Plast kompozit	 Svařovaný rám z profilů	 Pouze lab. Stojany
Druh lineárního posuvu	 Kuličkové pouzdro	 Lineární vedení	 Kluzné pouzdro	 Rolničkový systém
Druh vibroizolace	 Magnetická levitace	 Silentbloky	 Zavěšení v prostoru	 Vana s pískem
Materiál/výroba akčních členů	 Polykarbonát	 Ocel	 Hliník	 Vytiskované na 3D tisk.
Nastavování úhlu akčních členů	 Kuželové soukolí	 Čelní soukolí	 Ladící mechanika	 Vytiskované na 3D tisk.

Obrázek 17 Morfologická matice [vlastní zpracování]

5.1 KONCEPT STROJE 1 (ČERVENÁ)

První koncept naznačen na následujícím obrázku (Obrázek 18) je založen na pohonu všech os prostřednictvím elektromotorů. Pro řešený případ přístroje je žádoucí mít zpětnou informaci o poloze jednotlivých konzol. Z toho důvodu je možno použít krokový motor, nebo servomotor. Na hřídeli vystupující z elektromotorů je ustavena řemenice a posuvy všech os jsou provedeny unašečem aretovaným na řemeni. Zároveň se na obou stranách pro přímé a přesné vedení nacházejí vodící kolejnice. Nastavení natočení akčních členů je realizováno pomocí ladící mechaniky. Rám je složen z dřevo-plastových profilů a posuvy realizovány pomocí lineárního vedení. Izolace vůči vnějším vibracím je provedena pomocí silentbloků uložených na rámu.

Mezi výhody tohoto konceptu patří jednoznačně řízení pomocí elektromotorů. Má znalost přesné aktuální polohy a dokáže tak jednoduše s celým přístrojem pracovat. Dalším silným komponentem je lineární vedení po kolejnicích, které zachycuje značné radiální síly a disponuje přijatelnou tuhostí. Jednou z nevýhod je nepochybně celková cena přístroje. Cena motorů, řídicích jednotek a samotného programu se navýšila dvojnásobně, nebo trojnásobně.



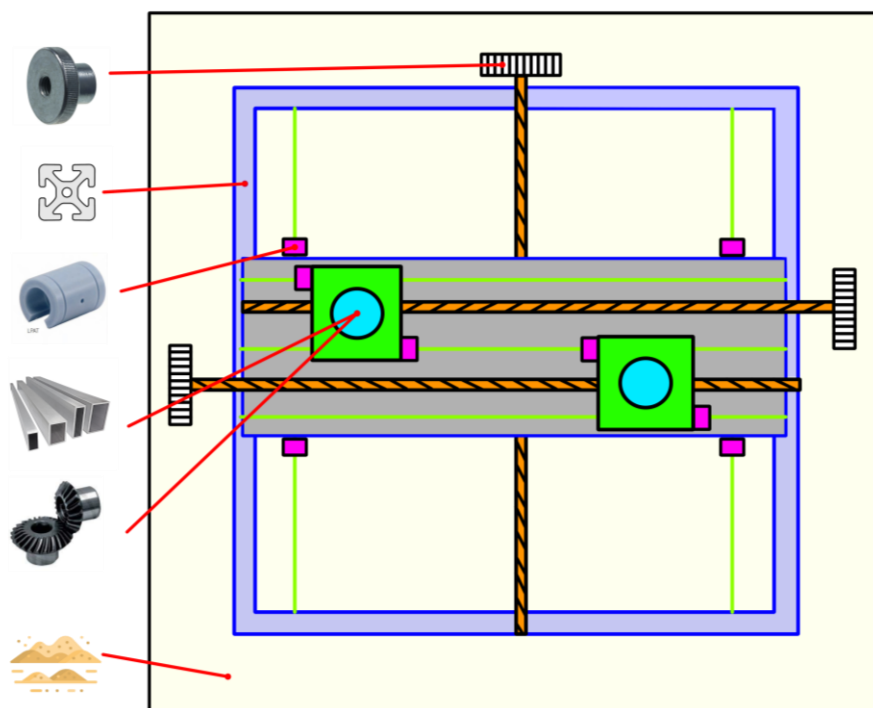
Obrázek 18 Navrhovaný koncept 1 [vlastní zpracování]

Z prvního konceptu vyplývá, že budou všechny posuvy a nastavení poloh provedeny mechanicky (ručně přes rýhovanou matici). V předchozím odstavci je uvedeno, že rozhodujícím faktorem je cena zařízení.

5.2 KONCEPT STROJE 2 (ZELENÁ)

Ve druhém navrženém konceptu naznačeném na následujícím obrázku (Obrázek 19) jsou veškeré pohyby poháněny rýhovanou maticí (mechanicky a ručně). Řemenice a řemeny nahrazeny závitovými tyčemi, které přinášejí výhodu oproti řemenovému převodu ve stabilitě v radiálním směru posuvu a rozhodně menší nároky na vodící prvky. Z výše uvedených kritérií jsou v tomto případě lineární vedení nahrazena kluznými ložisky a vodící tyčemi. Akční členy obrobene z hliníkových polotovarů a nastavení jejich přesného natočení provedeno pomocí dvou kuželových kol. Vibroizolace stroje je vyřešena pomocí nádoby vyplněné pískem.

Jedním z benefitů tohoto konceptu je vyšší tuhost akčních členů (tvořené z hliníkových polotovarů) v porovnání s předchozím konceptem. Největší nevýhodou tohoto návrhu je hmotnost. Z důvodu přidání vany naplněné tlumící hmotou ve formě pískové výplně je manipulace velice obtížná. Zároveň se zvýšenou tuhostí akčních členů a přidáním ocelových kuželových kol je navýšena hmotnost.



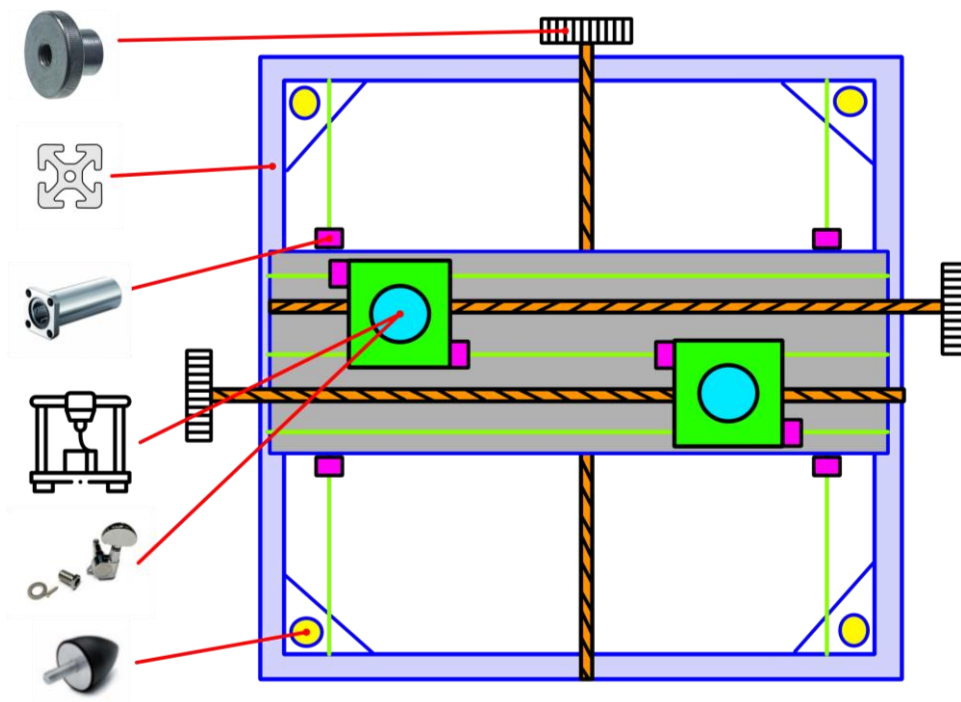
Obrázek 19 Navrhovaný koncept 2 [vlastní zpracování]

Zvolením této metody dojde k maximalizaci tuhosti a hmotnosti, a to vzhledem k nutnosti občasné manipulace s přístrojem není přijatelná varianta. Zároveň použitím kluzných plastových ložisek je dosaženo snížení pořizovacích nákladů lineárních posuvů. Z důvodu vyššího tření při pohybu ze statické polohy je pro uvedení do pohybu potřebná větší síla. Jelikož je ovládání posuvů mechanicky, tak je to vlastnost nežádoucí a ztěžující s ohledem na uživatelské ovládání a ergonomii.

5.3 KONCEPT STROJE 3 (MODRÁ)

Poslední návrh naznačený na následujícím obrázku (Obrázek 20) nabízí kombinaci dvou předchozích variant. Konkrétně využívá mechanického nastavování polohy posuvů a využívá pro izolaci od vnějších vibrací silentbloky uložené na rámu. Nastavení úhlu natočení akčních členů je realizováno prostřednictvím miniaturní šnekové převodovky. Tyto držáky na akční členy jsou vytisknuty na 3D tiskárně, prostřednictvím kterých si lze dovolit optimální design a zachovat nízkou hmotnost. Jako vodící prvky jsou zvolena kuličková pouzdra, která nabízejí poměrně přesné vedení a nízké tření mezi kuličkami a vodící tyčí.

Mezi výhody tohoto konceptu patří jednoznačně variabilita designu akčních členů (vytištěné na 3D tiskárně). Nízké tření při posuvu konzolí díky kuličkovým pouzdrům.



Obrázek 20 Navrhovaný koncept 3 [vlastní zpracování]

Tato metoda dosahuje nejlepšího poměru hmotnosti/tuhosti. Zároveň je tvořen design akčních členů až do limitů 3D tiskárny.

5.4 VÝBĚR VYHOVUJÍCÍHO KONCEPTU

Pro usnadnění volby nejvíce vyhovujícího konceptu, byla vytvořena tabulka (Tabulka 1) obsahující metodu pořadí. V první řadě byly nevrženy nejdůležitější kritéria sestupně K1 až K8. K jednotlivým kritériím byly následně subjektivně přiřazeny pořadová čísla pro všechny koncepty. Pořadí 1 až 3 bylo vybráno na základě důkladné analýzy možností a významnosti kritéria. Po určení všech hodnot byla vypočtena suma pořadových čísel a z těch následně vypočtena normovaná váha. Hodnota, která určuje výsledný koncept, jeho podíl a váhu vzhledem k ostatním konceptům.

POŘADÍ		KONCEPT 1	KONCEPT 2	KONCEPT 3
		ČERVENÁ	ZELENÁ	MODRÁ
CENA	K1	3	1	2
HMOTNOST	K2	2	3	1
TUHOST	K3	2	1	3
MANIPULACE	K4	2	3	1
JEDNODUCHOST VÝROBY	K5	2	3	1
NÁROČNOST OVLÁDÁNÍ	K6	1	3	2
NÁROČNOST ŘÍZENÍ	K7	3	2	1
PŘESNOST POLOHOVÁNÍ	K8	1	2	2
SUMA		16	18	13
NORMOVANÁ VÁHA	w _j	0,34	0,38	0,28

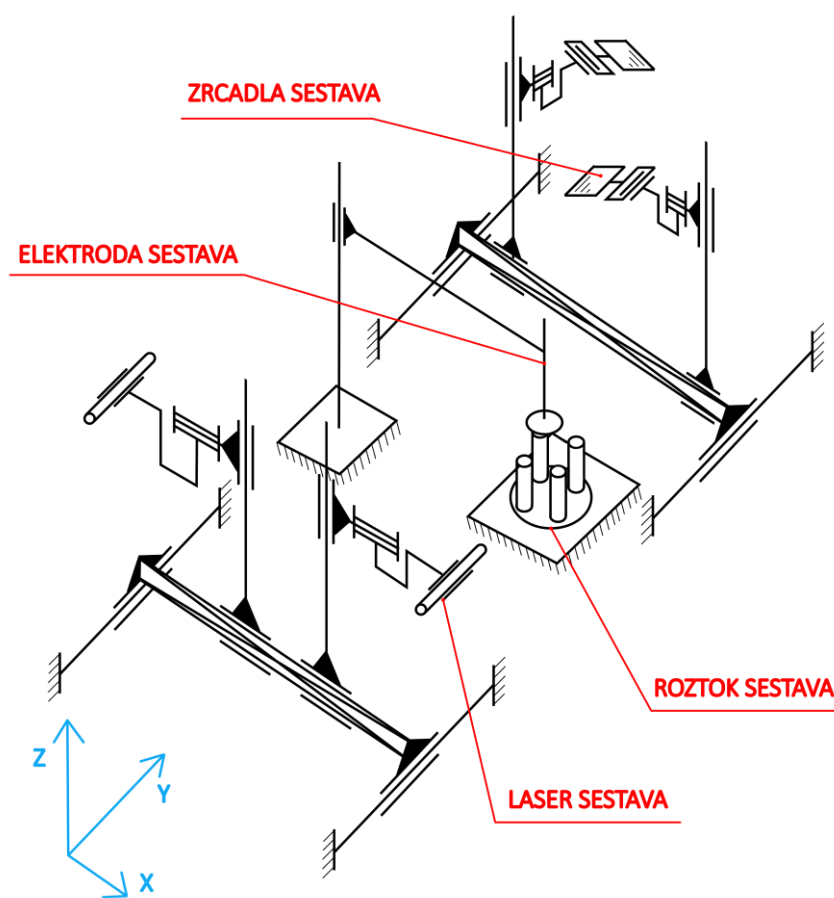
Tabulka 1 Metoda pořadí – výběr vyhovujícího konceptu

Z předchozí tabulky vychází jako nejvíce vyhovující poslední koncept označený modrou barvou v morfologické matici (Obrázek 17). Použitý nástroj zvaný *metoda pořadí* nelze brát jako jednoznačný ukazatel a výsledný koncept vybrat pouze na základě jeho výsledku. Je nutné brát v úvahu i jiná kritéria, která se nedají kvantifikovat pořadovým číslem, jako například určitá konstrukční zkušenost, spolehlivost, estetika, odolnost. Všechny tyto poznatky byly brány v úvahu pro finální výběr konceptu.

Na základě všech jmenovaných předchozích výhod, nevýhod a výsledku metody pořadí byl vybrán koncept poslední – **KONCEPT 3**. V kapitole návrhu (Kapitola 5.3) je uvedena

nesporná výhoda poměru hmotnosti/tuhosti. Zároveň je návrh flexibilní z důvodu možnosti tisku ustavení akčních členů na 3D tiskárně. Použití miniaturních šnekových převodovek pro nastavení úhlu byl jeden z požadavků zadavatele.

Po schválení konceptu zadavatelem, bylo navrženo schéma celkového zařízení vyobrazené na následujícím obrázku (Obrázek 21). Sestava se skládá ze 4 hlavních podsestav: LASER SESTAVA, ZRCADLA SESTAVA, ELEKTRODA SESTAVA a ROZTOK SESTAVA. Jednotlivé sestavy budou popsány v následujících odstavcích.



Obrázek 21 Kinematické schéma přístroje [vlastní zpracování]

Sestava **LASER SESTAVA**, ve které je umístěn posuv ve všech osách naznačeného souřadného systému v obrázku. Celkovou konzoli lze posouvat v ose Y, jednotlivé sekce laserů lze pro jednu hodnotu Y vzdálenosti nastavit libovolné polohy X. Zároveň lze akční členy nastavovat v ose Z (posuv a rotace). Další nastavitelnou osou je rotace laserů kolem osy Y nezávisle na sobě.

Sestava **ZRCADLA SESTAVA** je zrcadlově stejná, jako sestava laserů. Jediný rozdíl je v typu akčního členu, kterými jsou v tomto případě zrcadla.

Sestava **UCHYCENÍ ELEKTRODY** je dominantní prvek přístroje. Poloha vůči rámu stroje je zafixovaná. Skládá se z hlavního nosníku, na kterém lze rameno posouvat libovolně v ose Z (posuv a rotace). Na konci ramene se nachází vyměnitelná elektroda.

Sestava **ROZTOK SESTAVA** je zafixovaná pevně na rámu. Obsahuje revolverovou hlavu, kterou lze volně otáčet kolem vlastní osy Z a 4 podstavy pro 4 různé zkoumané polymerní roztoky.

Sestava **RÁM** sice na obrázku naznačena není, ale v přístroji hraje nedílnou součást. Tento komponent ustavuje polohu jednotlivých podsestav, dodává zařízení tuhost a usnadňuje manipulaci. Zároveň je zhotoven z nevodivého materiálu, takže pracuje jako izolátor stroje. Jednotlivé sestavy jsou spojeny v jednom kompaktním rámu a tvoří jednu velkou sestavu schopnou poskytnout všechny požadavky na pozorování hladiny polymerního roztoku.

6 NÁVRH VIBRO-IZOLACE PŘÍSTROJE

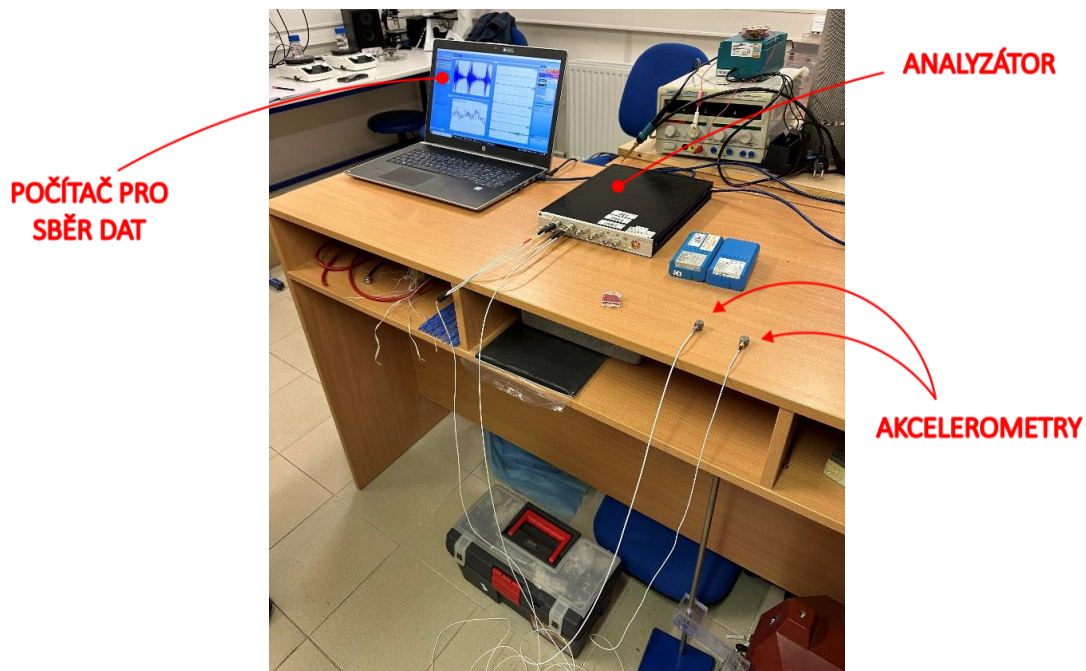
V návaznosti na kontext prezentovaný v úvodní části, možnost snížení úrovně vibrací zařízení od vnějších vibrací je klíčovým prvkem konstrukce, kterým zařízení musí disponovat. Pokud je sledovaným parametrem odraz laserového paprsku od hladiny kapaliny, je nutné zajistit stabilnější obraz pro optimální podmínky užívání obsluhou. Jedná se o obsáhlou skupinu konstrukčních částí a uzlů. Nedostatky použitých dílců (vůle a odchylky) hrají v celkové tuhosti přístroje negativní roli a snížit úroveň vibrací takovéto soustavy je velmi náročné.

Před samotným návrhem tlumících prvků a jejich geometrických a materiálových parametrů (zejména tuhosti), bylo nezbytné zjistit, jakému vnějšímu buzení vibrací je přístroj vystaven. Pro získání uvedených parametrů bylo využito technického zázemí katedry mechaniky, pružnosti a pevnosti.

Na základě podrobného rozboru řešeného problému byla navržena vhodná měřicí metodika v podobě triaxiálních piezo-elektrických akcelerometrů. Sensory jsou určeny k zaznamenávání hodnot ve všech třech osách prostřednictvím piezoelektrického jevu, který generováním náboje a následnému přepočtu je schopen s velikou přesností určit zrychlení objektů. Byly zvoleny dva typy s odlišnou sensitivitou, první typu 8763B1 se sensitivitou v ose Z (v našem případě osa nejvíce pozorovaná) $5,18 \text{ mV/g}$. V našem případě bude klíčová z hlediska posouzení místa a předchozích zkušeností, osa Z. Využit byl akcelerometr (8640A5T) s možností měření pouze osy Z, ale s mnohonásobně větší sensitivitou 1050 mV/g . Akcelerometry jsou součástí měřicí ústředny značky Crystal – SPIDER BOX. Ten přijímá signál od měřících elementů, zpracovává je a dále komunikuje s počítačem. V počítači je následně v programu Engineering Data Management Spider – DSA.

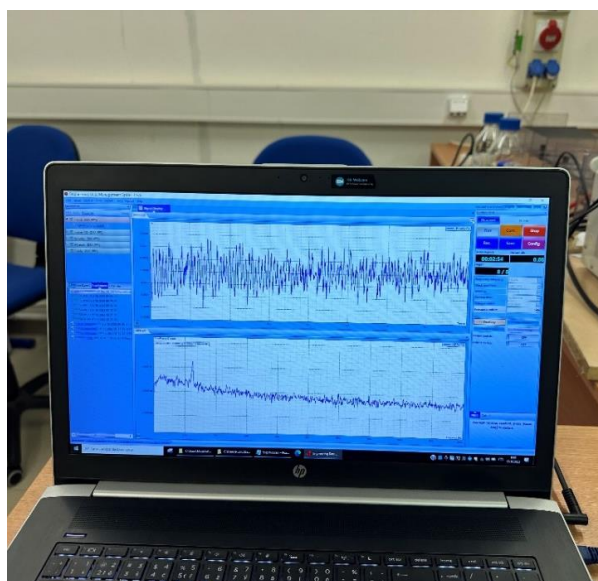
6.1 MĚŘENÍ ZRYCHLENÍ

Dle zadávací dokumentace bude zařízení využíváno v laboratoři na katedře netkaných technologií na stole zobrazeném na obrázku níže (Obrázek 22). V rámci analýzy celkového prostoru v okolí stolu bylo provedeno měření na třech místech.



Obrázek 22 Měření zrychlení na ploše stolu [vlastní archiv autora]

Průběh měření v programu Engineering Data Management je naznačen na následujícím obrázku (Obrázek 23).



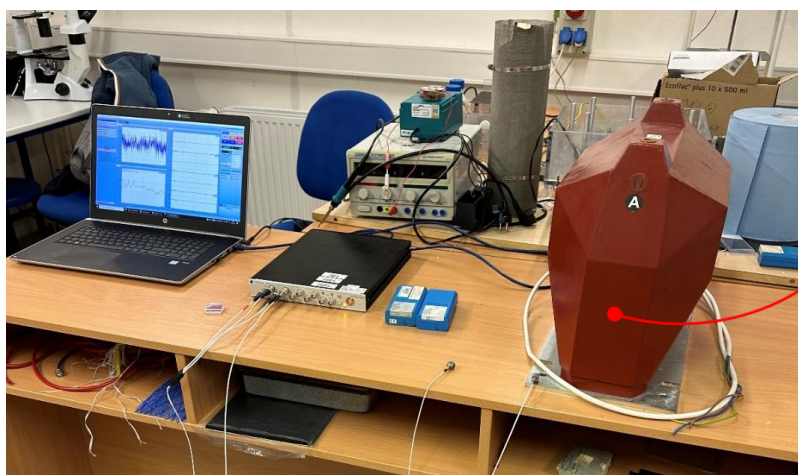
Obrázek 23 Prostředí programu Engineering Data Management [vlastní archiv autora]

Software pro zpracování dat byl nastaven na četnost 8 měření a následného vyhodnocení. Vyhodnocovací proces má tři různé možnosti nastavení. První z nich je Lineární průměrování a jedná se o sumu všech hodnot z 8 měření a následném vydělení počtem měření. Popsaná měřicí metoda je rychlá, ukazuje původní data. Je vhodná na rychlá, nebo stacionární měření. Druhá metoda se nazývá Exponenciální průměrování. V této metodě má každé měření větší váhu než to předcházející. Výhodou měření je, že může být použito nekonečně dlouho. Nevýhodou je, že jakákoliv dynamická změna v měření má obrovský dopad na výsledné hodnoty a trvá dlouho, než klesne na původní hodnotu. Vyhovuje tedy více stabilnímu než dynamicky se měnícímu signálu. Poslední zvolenou metodou je Peak-Hold. Jedná se o metodu, která zobrazuje v každém bodě průběhu měření jeho maximální hodnotu. Je vhodný pro zachovávání nejvyšší hodnoty zrychlení a lze vyvozovat závěry pro nejméně ideální možnou variantu. Uvedená kritéria přesně odpovídají našim požadavkům a proto byl zvolen Peak-Hold.[19]

První, nejdůležitější měření proběhlo na pracovním stole. Jak bylo popsáno v přechozí kapitole (kapitola 6), měření se uskutečnilo prostřednictvím dvou akcelerometrů (jeden triaxiální a druhý pouze v ose Z s vysokou sensitivitou). Akcelerometry byly připevněny na povrch stolu pomocí včelího vosku, který naměřená data zkresluje zanedbatelně a díky svým materiálovým vlastnostem stabilizuje snímač na místě. Budící frekvence, které v laboratoři opakovaně nastávají jsou širokopásmové. Simulace reálné situace byla realizována prostřednictvím chůze, běžnými pracovními činnostmi na pracovním stole, položením předmětů na stůl, mluvením atd...

Další měření proběhlo na podlaze laboratoře. Bylo nutné zjistit, jak se chová těleso podlahy při buzení od obsluhy laboratorního zařízení a zdali je útlum vibrací podlahy významný. Byly opět použity oba akcelerometry k měření. Snímač citlivý v ose Z a triaxiální akcelerometr pro všechny osy. Buzení bylo provedeno obdobným způsobem jako v předchozím případě a byl simulován klasický pohyb osob a manipulace s věcmi.

Poslední měření proběhlo opět na pracovním stole pouze s tím rozdílem, že se zde nacházelo těžké závaží (naznačeno na obrázku níže - Obrázek 24). Zvýšení hmotnosti systému bylo realizováno pomocí traťové značky ABB – Kgug 36 s hmotností okolo 80 kg. Důvodem zvoleného typu měření bylo dokázat a zjistit, jak se zvýšením hmotnosti stane systém méně citlivým vůči vnějším vibracím a dokáže odstranit nežádoucí efekty rezonance.



Obrázek 24 Měření na stole se závažím [vlastní archiv autora]

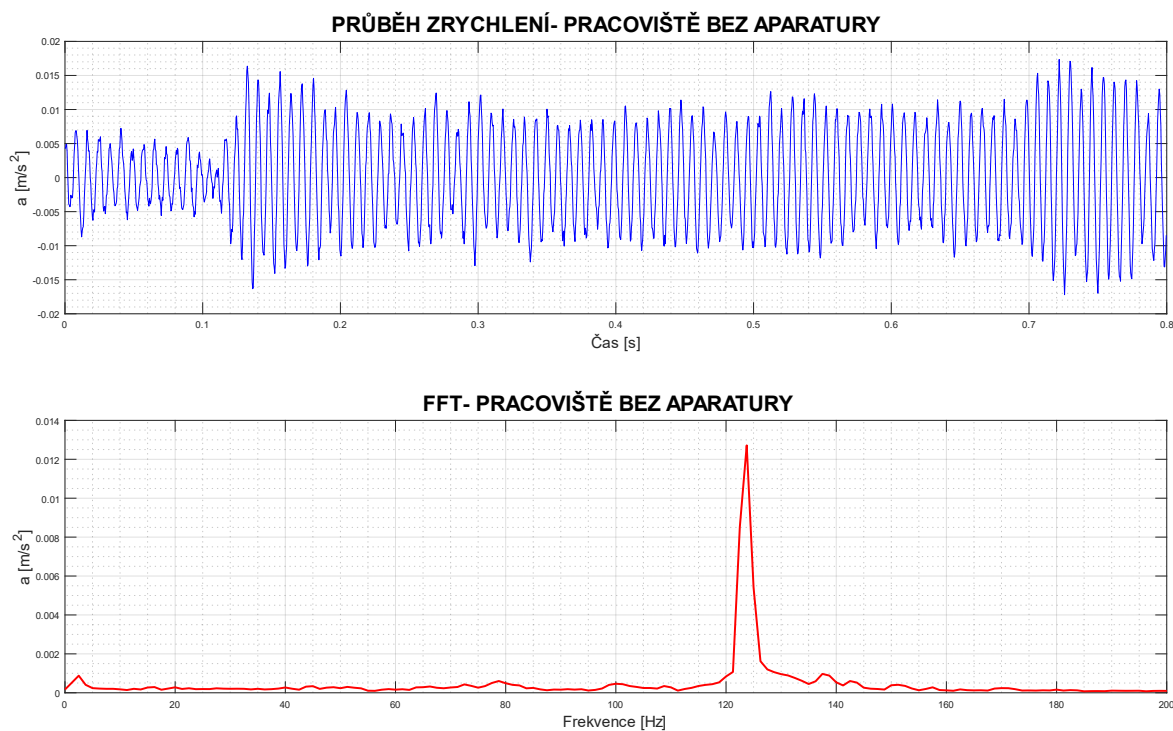
6.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Použitý software pro analýzu dat nabízí možnost získání dvou souborů z měření. Jeden obsahující jednotlivé hodnoty zrychlení závislé na čase a následně zrychlení závislé na frekvenci (FFT). Aby bylo možné určit jednotlivé dominantní frekvence, které mají výrazný dopad na zrychlení systému, je nezbytné provést Fourierovu transformaci. Tato integrální transformace slouží k dekompozici měřeného signálu do jeho frekvenčních komponentů. Právě díky této matematické operaci jsme schopni na první pohled z uskutečněného měření určit dominantní budící frekvence. Na základě těchto vypočtených a graficky určených hodnot je následně možné určit, zdali bude při chodu laboratorního přístroje nastávat stejná hodnota budících a vlastních frekvencí, a tudíž nastane rezonance (stav vysvětlen v kapitole 3.2).

Běžné softwary pro získání a následného zpracování dat zrychlení mají výpočet zrychlené Fourierovy transformace implementovaný a lze provést analýzu výsledků hned při měření. Použitý software pro měření uvedený v předchozí kapitole (kapitola 6.1) touto možností disponoval.

Exportované hodnoty byly následně pro lepší prezentaci v této práci importovány do interaktivního programového prostředí Matlab. Byl sestaven kód, který hodnoty přepočítal z nevyhovujících jednotek, ve kterých program pracuje (jednotky g/N) a z jednotlivých měření vygeneruje grafy.

6.2.1 PRACOVIŠTĚ BEZ VEŠKERÉ APARATURY

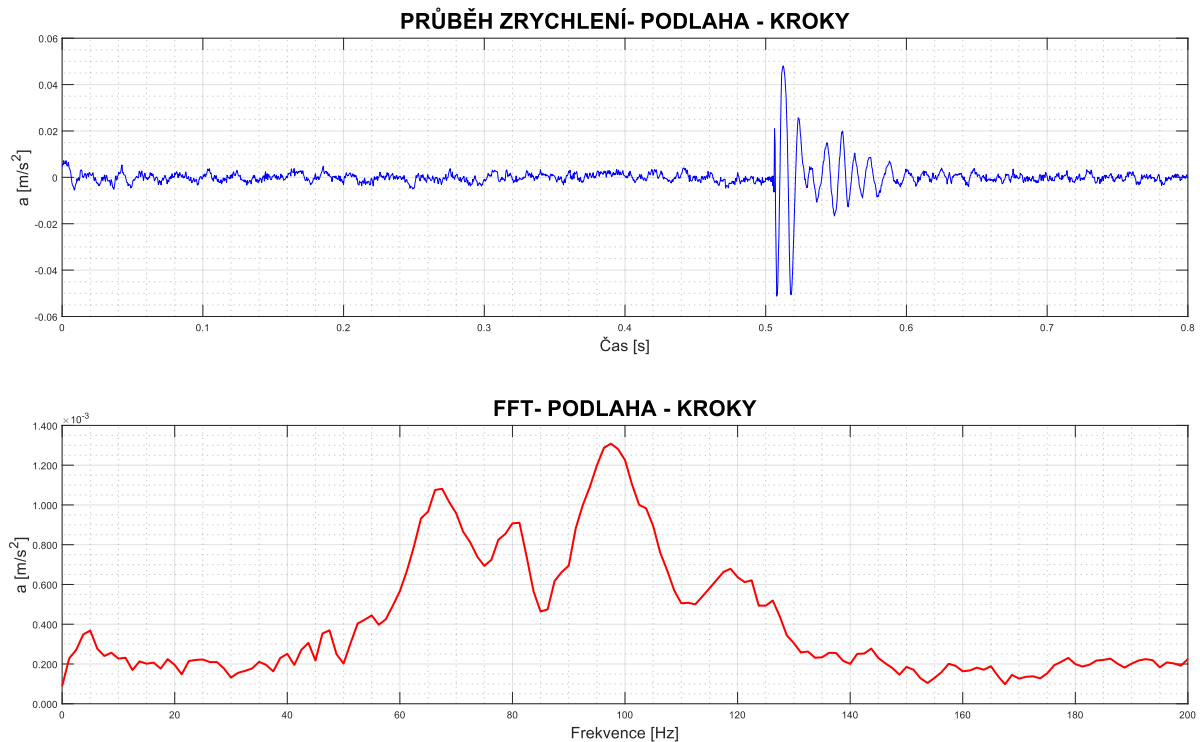


Obrázek 25 Naměřené hodnoty na samotném stole [vlastní zpracování]

Z výsledků měření zrychlení na samotném pracovním stole (Obrázek 25), na kterém se zkonstruovaný přístroj nachází je patrné, že systém má nedostatečný vnitřní útlum a vibrace (zrychlení) nevykazuje dostatečnou disipaci energie (odpor prostředí). V rámci akcelerační – frekvenční charakteristiky vykazuje systém velice dominantní vlastní frekvenci v oblasti kolem hodnoty 124 Hz .

V rezonanční oblasti (v místě, kde systém je buzen frekvencí 124 Hz , což se rovná jeho vlastní frekvenci) dosahuje zrychlení přes desetinásobek průměrné hodnoty v celém pásmu buzení. Pokud by byl finální přístroj používán pouze na tomto stole, bylo by nutné mechanické struktury přeladit mimo zmiňovanou hodnotu.

6.2.2 PODLAHA

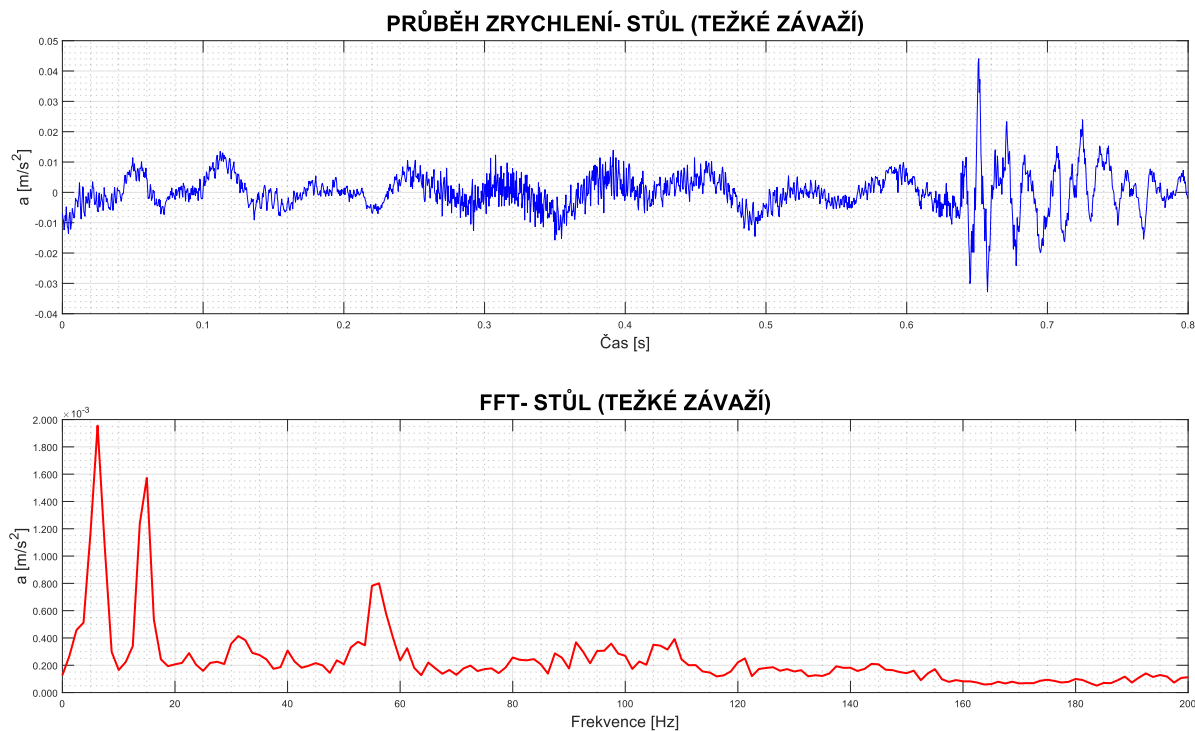


Obrázek 26 Naměřené hodnoty na podlaze laboratoře [vlastní zpracování]

Měření na podlaze vybuzené běžným pohybem v laboratoři (Obrázek 26) vykazuje dvě dominantní vlastní frekvence, a to o hodnotách $67,5 \text{ Hz}$ a $97,5 \text{ Hz}$. Amplituda zrychlení je v rezonančních oblastech 10krát menší oproti předchozímu měření (FFT spektrum).

System tedy vykazuje dobré tlumení a vlastní frekvence nemají výrazné hodnoty, jsou více širokopásmové. Na základě měření lze konstatovat, že vlastní frekvence podlahy a všech zařízení na ní umístěných, se nenachází v rezonanční oblasti pracovního stolu (předchozí měření Obrázek 25).

6.2.3 STŮL SE ZÁVAŽÍM (80 kg)



Obrázek 27 Naměřené hodnoty na stole s těžkým závažím [vlastní zpracování]

Výsledek posledního měření (Obrázek 27) prokazuje předpoklady změn tlumících vlastností s nárůstem hmotnosti systému. Z grafu FFT vychází jednotky zrychlení desetinně menší, než na nezatíženém pracovním stole (kapitola 6.2.1). První dvě dominantní frekvence (6 Hz a 15 Hz) odpovídají přímo počáteční fázi pohybu buzení (udeření do stolu). Další dominantní frekvencí je 55 Hz.

6.3 ZÁVĚR Z MĚŘENÍ

Na základě získaných výsledků došlo k závěru, že přítomnost tělesa s vysokou hmotností a přijatelnými tlumícími vlastnostmi je příznivá. Pro budoucí provoz zařízení bude potřeba podobný přípravek zkonstruovat. Další variantou by bylo přidání nádob vyplněných pískem. Písek má dobrou disipaci vnější energie, která probíhá při interakci jednotlivých zrn.

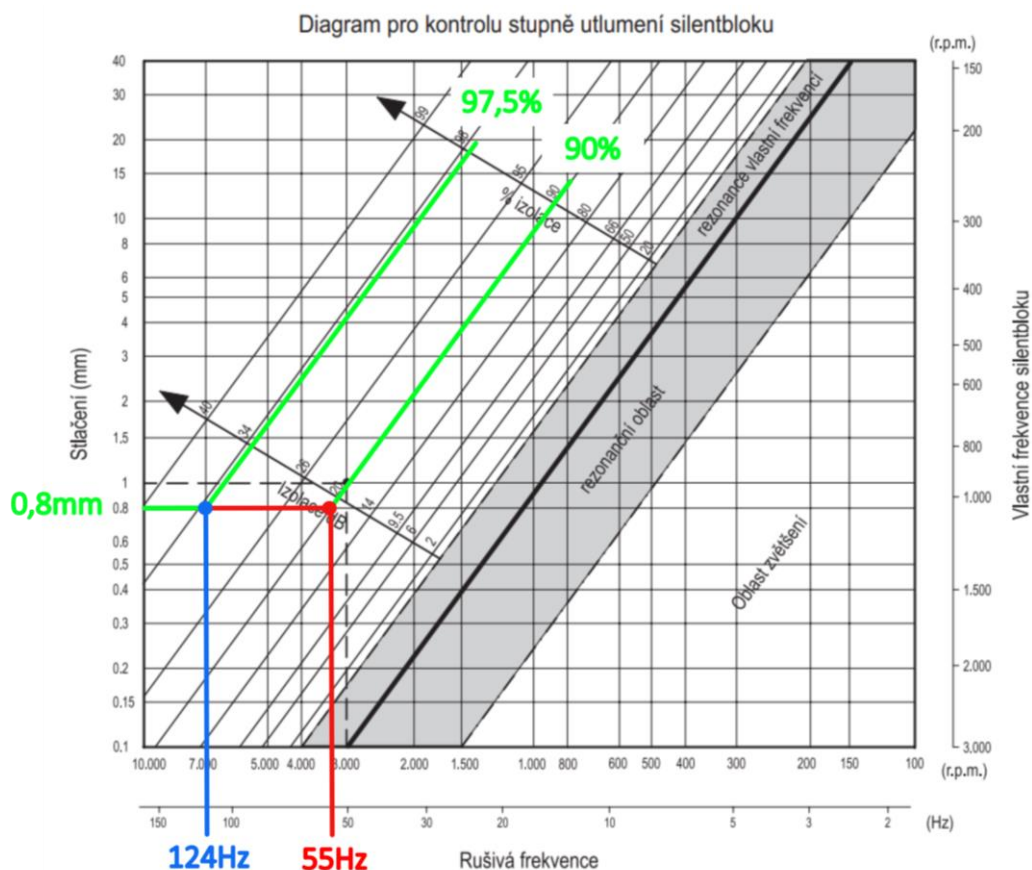
6.4 SPECIFIKACE SILENTBLOKŮ

Možnosti, jak celkový systém izolovat vůči vnějším vibracím je popsáno v rešerši této práce (Kapitola 3.4). V rámci návrhu vibroizolačního systému pro laboratorní přístroj pro vizualizaci povrchových vln, byl kladen důraz na eliminaci co nejvíce vnějšího buzení (běžné pracovní činnosti) a zároveň čerpání co nejméně finančních prostředků. Uvedené technickoekonomické požadavky jsou ovšem často protichůdné, což vyžadovalo zhodnocení situace. Výsledným klíčovým aspektem tohoto procesu byla prioritizace minimalizovat finanční náklady. Nakoupeny byly pasivní prvky (silentbloky), které byly využity ve výsledné sestavě.

Hmotnost celé sestavy byl stěžejní parametr, který bylo nutno získat. Jelikož byl nákup proveden před samotnou montáží, hmotnost musela být stanovena ze softwaru Creo Parametrics. Uvedený proces zahrnoval definici všech materiálových vlastností jednotlivých dílů.

$$m = 35 \text{ kg} \tag{6.4.1}$$

Volba požadovaného silentbloku proběhla výčtem z následujícího grafu, poskytnutého v technických informacích firmy.



Měření v předchozí kapitole (kapitola 6.2.1) objevila hlavní rušivou frekvenci 124 Hz . Následující kapitola měření se zatížením (kapitola 6.2.3) prokázala budící frekvenci 55 Hz . Z důvodu nejasné konfigurace pracovního stolu (zdali bude použito závaží, nebo ne) je nezbytné vybrat takové silentbloky, které dokáží s určitou účinností potlačit obě uvedené frekvence.

V grafu (Obrázek 28) se na X-ové souřadnici nacházejí rušivé frekvence a na ose Y axiální stlačení vybraného silentbloku. Pro zvolenou izolaci (naznačeno ve vrchní části grafu) o hodnotě min 90% bylo pro obě rušivé frekvence odečteno stlačení $x=0,8 \text{ mm}$ (izolace pro frekvenci 124 Hz s účinností $97,5 \%$ a pro frekvenci 55 Hz s účinností 90%).

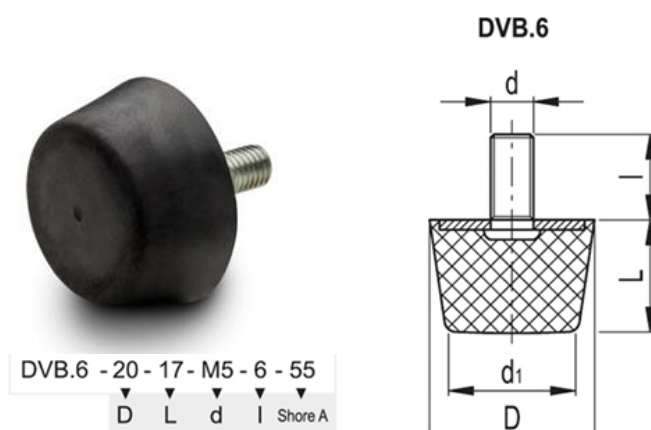
Do sestavy budou přidány 4 pasivní tlumící prvky. Následuje výpočet potřebný pro typizování vhodného silentbloku.

$$F_I = \frac{1}{4} \times F_C = \frac{1}{4} \times 343 = 85,75 \text{ N} \quad (6.4.2)$$

Z Hookova zákonu je určena tuhost.

$$F_I = k \times x \Rightarrow k = \frac{F_I}{x} = \frac{85,75}{0,8} = 107,19 \text{ N/mm} \quad (6.4.3)$$

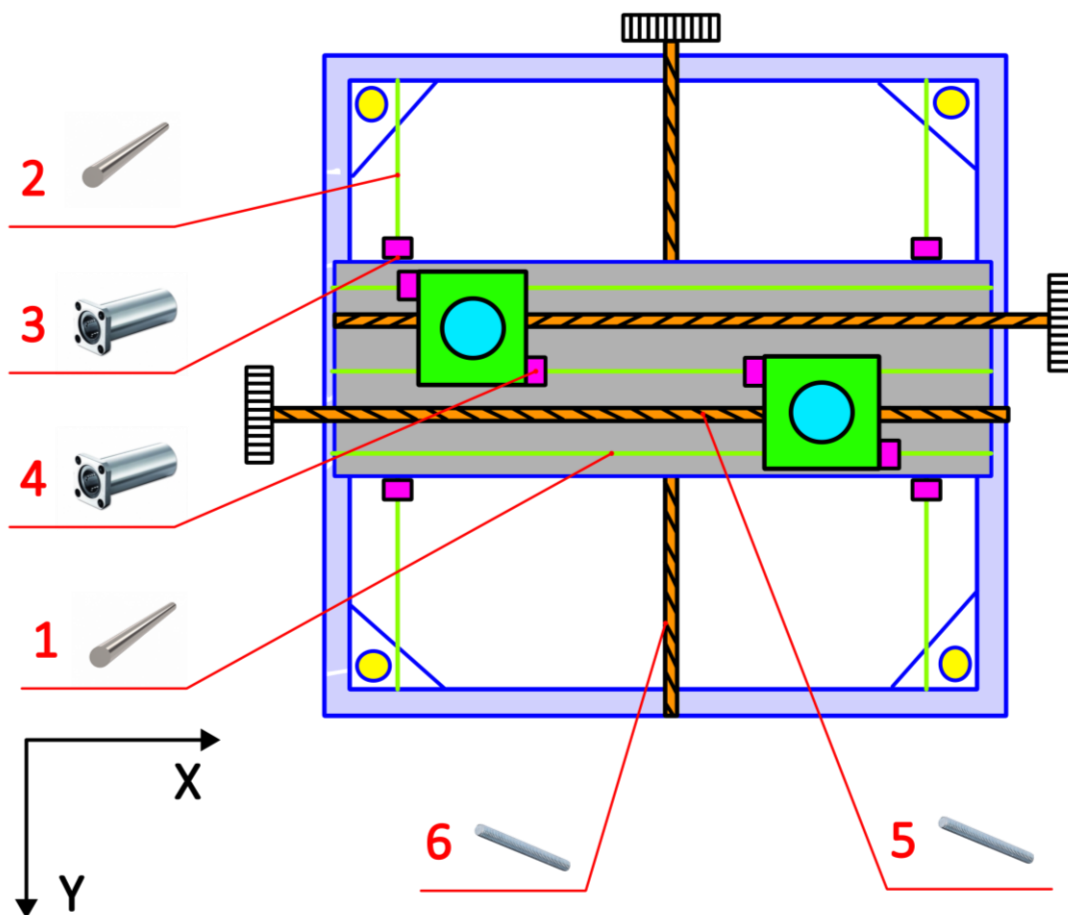
Dle vypočtené tuhosti byl typizován nejvíce vyhovující silentblok s označením DVB.6-20-17-M8-18-70 (Obrázek 29) a tuhostí 110 N/mm . Výhodou zvoleného tlumiče je jeho kónický tvar, který zesílí stabilitu systému. Další nespornou výhodou je zvětšující se plocha při zvyšujícím zatížení. Zároveň tato vlastnost i lineárně zvyšuje plochu dotyku se stolem (zvyšuje stabilitu).



Obrázek 29 Vybraný silentblok [21]

7 DIMENZOVÁNÍ KOMPONENTŮ

V rámci návrhu a ověření vhodného výběru komponentů bylo nutné provést potřebné výpočty, aby nedošlo k nežádoucím deformacím a případným poruchám dílů. Na následujícím obrázku (Obrázek 30) je naznačeno schéma s komponenty, kterých se následující výpočty budou týkat.

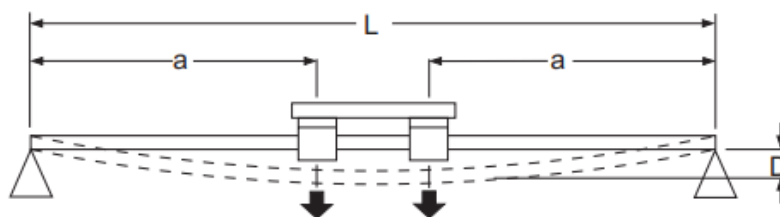


Obrázek 30 Schéma navrhovaného zařízení [vlastní zpracování], 1,2 -vodící tyče, 3,4 -kuličková ložiska, 5,6 -závitové tyče

7.1 VODÍCÍ TYČE

Vodící tyče (Obrázek 30 -pozice 1 a 2) budou osazeny dvěma sekcemi a slouží pro přesné vedení, které vyžaduje použití kuličkových ložisek. Hmotnost jedné sekce byla stanovena 1,9 kg. V rámci zvýšení bezpečnosti a předpokladu změny konstrukce (přidání kabelů, různých akčních členů) bude hmotnost dosahovat 3 kg. V unašeči budou nalisována dvě kuličková ložiska, zátěž na jedno ložisko bude tím pádem poloviční. Radiální síla na jedno ložisko vychází $Fr_1=14,715N$.

Jedná se o průhyb staticky neurčitého prostého nosníku zatíženého dvěma sekcemi. Hodnota průhybu je vypočítána pomocí následujícího výpočtu a parametry odečteny z následujícího schématu (Obrázek 31).



Obrázek 31 Výpočet průhybu nosníku [20]

$$D = \frac{F \times a \times (3 \times L^2 - 4 \times a^2)}{48 \times EI} \quad (7.1.1)$$

Byla navržena vodící tyč o průměru 10 mm a té přísluší hodnota součinitele pro povrchově kalené tyče $EI=93,41 \text{ Nm}^2$. Všechny ostatní rozměry vychází z navržené konstrukce laboratorního stroje. Pro lineární posuv v ose X (Obrázek 30 -pozice 1).

$$D_1 = \frac{14,715 \times 0,105 \times (3 \times 0,310^2 - 4 \times 0,105^2)}{48 \times 93,41} = 0,000084 \text{ m} \quad (7.1.2)$$

$$D_1 = 0,084 \text{ mm}$$

Průhyb nosníku vychází $0,084 \text{ mm}$, což je **vyhovující** pro řešený případ.

Pro lineární posuv v ose Y (Obrázek 30 -pozice 2) je počet ložisek totožný. Jediný rozdíl je v rozměrech vodící tyče a hmotnosti, která činí 9 kg . Radiální síla je tedy $Fr_2=44,145 \text{ N}$.

$$D_2 = \frac{44,145 \times 0,101 \times (3 \times 0,322^2 - 4 \times 0,101^2)}{48 \times 93,41} = 0,000269 \text{ m} \quad (7.1.3)$$

$$D_2 = 0,269 \text{ mm}$$

Průhyb v ose Y vychází $0,269 \text{ mm}$, což je stále **vyhovující**.

Zvoleny budou vodící tyče o průměru 10 mm . Chromovaná tyč s označením dodavatele W10.

7.2 AXIÁLNÍ KULIČKOVÉ LOŽISKO

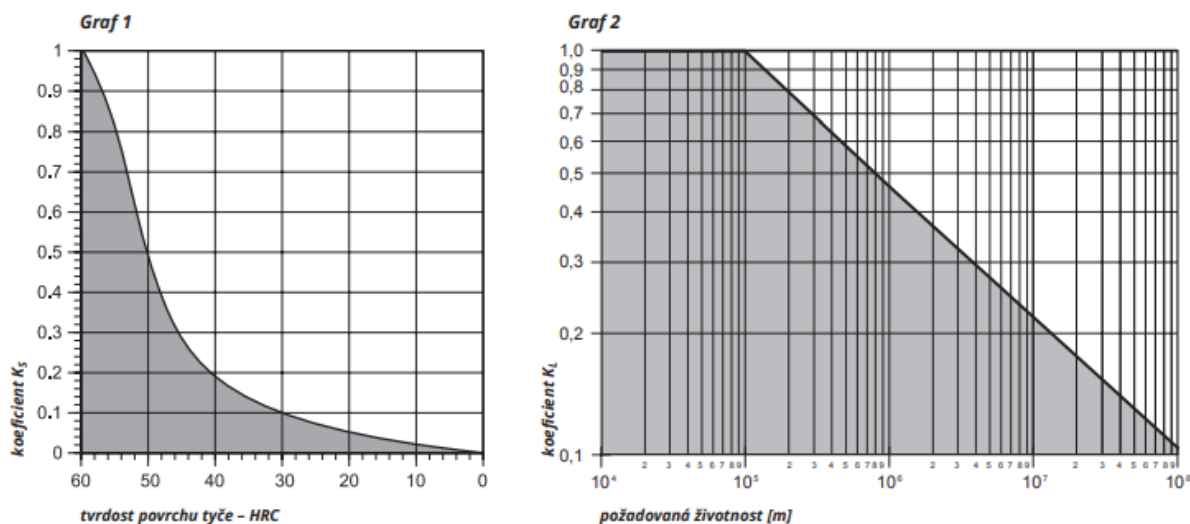
Kuličková ložiska (Obrázek 30 -pozice 3 a 4) jsou nabízena v mnoha variantách konstrukcí a rozměrech. Správný výběr vyhovujících ložisek je zásadní pro správnou funkci laboratorního přístroje.

Zkladním parametrem je dynamická únosnost a životnost ložiska. Potřebná dynamická únosnost je vypočtena pomocí následujícího vzorce:

$$W_R = \frac{F}{K_Q \times K_S \times K_L} \quad (7.2.1)$$

Volba koeficientů z následujícího obrázku (Obrázek 32):

$$K_Q = 1$$



Obrázek 32 Volba koeficientů [20]

$$K_S = 0,5 \text{ (pro tvrdost povrchu tyče HRC50)}$$

$$K_L = 1 \text{ (požadovaná životnost } 10^5 \text{)}$$

Kuličková ložiska v ose X (Obrázek 30 -pozice 4):

$$W_{R1} = \frac{14,715}{1 \times 0,5 \times 1} = 29,43N \quad (7.2.2)$$

Pro kuličková ložiska použita v ose Y (Obrázek 30 -pozice 3) platí:

$$W_{R2} = \frac{44,145}{1 \times 0,5 \times 1} = 88,29N \quad (7.2.3)$$

Z hlediska konstrukce unašečů a konzolí je vhodné použít axiální kuličkové ložisko s přírubou (přesné vedení, malá třecí plocha mezi kuličky a vodící tyčí). Zvoleny byly kuličkové objímky s přírubou LMH 10L UU pro posuv v ose X a LMH 10 UU pro posuv Y. Dovolená dynamická únosnost pro 10L je $W_{1min}=588 N$ a pro 10 je $W_{2min}=265 N$. Obě varianty jsou v dovolené únosnosti a znamená to tedy, že **vyhovují**.

Životnost v metrech vychází z následujícího vzorce:

$$L_M = \left(\frac{W}{F} \times K_Q \times K_S \right)^3 \times 10^5 \quad (7.2.4)$$

Tento vzorec byl využit pro obě osy a jako dynamickou životnost byly dosazeny tabulkové hodnoty příslušných vybraných dílců.

$$L_{M1} = \left(\frac{588}{14,715} \times 1 \times 0,5 \right)^3 \times 10^5 = 7,976 \times 10^8 m \quad (7.2.5)$$

$$L_{M2} = \left(\frac{265}{44,145} \times 1 \times 0,5 \right)^3 \times 10^5 = 2,704 \times 10^6 m \quad (7.2.6)$$

Z těchto hodnot je patrné, že zvolená ložiska jsou více než dostačující pro laboratorní použití. Vzhledem k pracovnímu zdvihu a frekvence nastavování polohy lze výpočet životnosti v hodinách zanedbat.

7.3 ZÁVITOVÉ TYČE

Pro lineární posuv budou použity závitové tyče (Obrázek 30 -pozice 5 a 6). Rotační pohyb z mechanického nastavení obsluhou se bude transformovat na posuv lineární jednotlivých sekcí. Je tedy nezbytné kontrolovat závitové tyče, aby nedocházelo k nežádoucím deformacím a poruchám.

Z hlediska rozměrů vodících tyčí, samotné konzole a unašeče byly zvoleny závitové tyče metrické M10 a pro hlavní rameno M12. Jelikož byl tento typ vybrán, proběhne tedy pouze kontrolní výpočet z porovnání s dovolenými hodnotami.

$$\sigma_t = \frac{F_0}{S_V} \leq \sigma_{Dt} \Rightarrow \frac{F_0}{\frac{\pi \times d^3}{4}} \leq \sigma_{Dt} \quad (7.3.7)$$

Zvoleny jsou závitové tyče pevnosti 8.8. Z toho vyplývá mez pevnosti $R_m = 800 MPa$ a $R_k = 640 MPa$. Vzhledem k charakteru zatížení, bylo zvoleno střídavé.

$$\sigma_{Dt} = C_{III} \times \frac{\sigma_K}{k} = 0,6 \times \frac{640}{2} = 192 \text{ MPa} \quad (7.3.8)$$

Síla, která namáhá osově šrouby byla zvolena vzhledem ke složité konstrukci a nízkým rychlostem (a tím pádem i zrychlení), jako reakce na třecí síly od kuličkových ložisek. Součinitel tření byl vzhledem k mazaným vodícím tyčím (technická vazelína) zvolen $f = 0,1$.

$$F_{o1} = f \times N = 0,1 \times 14,715 = 1,4715 \text{ N} \quad (7.3.9)$$

Z toho vyplývá pro osu X (Obrázek 30 -pozice 5):

$$\frac{1,4715}{\frac{\pi \times 0,007938^2}{4}} \leq 192 \quad (7.3.10)$$

$$0,029 \leq \mathbf{192} \quad (7.3.11)$$

Pro osu Y (Obrázek 30 -pozice 6) platí:

$$F_{o2} = f \times N = 0,1 \times 44,145 = 4,4145 \text{ N} \quad (7.3.13)$$

$$\frac{4,4145}{\frac{\pi \times 0,007938^2}{4}} \leq 192 \quad (7.3.14)$$

$$8,9 \leq \mathbf{192} \quad (7.3.15)$$

Z výsledků je patrné, že namáhání v závitových tyčích je minimální, což naznačuje, že je malá pravděpodobnost výskytu deformací či nežádoucích poruch. Závitové tyče **vyhovují**.

7.4 DIALEKTRICKÁ PEVNOST

Dielektrická pevnost je důležitým parametrem pro bezpečnost obsluhy. Dielektrikum bylo v tomto případě vzduch a izolanty v oblasti zařízení kolem elektrody a podstavy. Bezpečná vzdálenost vodivých materiálů kolem tohoto místa byla kritická. Důvodem byl tok elektrické energie po celém stroji.

$$E_p = \frac{U_p}{l} \leq \sigma_{Dt} \Rightarrow l = \frac{U_p}{l} = \frac{30}{1} = 30 \text{ mm} \quad (7.4.1)$$

Nejvyšší napětí je stanoveno na velikost $U_p=30 \text{ kV}$ a dielektrická pevnost zvolena $EP=1\text{kV/mm}$ [20]. Spodní hranice průrazné vzdálenosti vychází na **30 mm**.

8 VÝROBA FUNKČNÍHO ZAŘÍZENÍ

V první řadě byly nakoupeny profily, které budou tvořit rám stroje a zároveň budou sloužit pro zvýšení stability vysokých komponentů (snížení citlivosti na vnější buzení v podobě vibrací). Profily byly zvoleny z nevodivého materiálu pro zvýšení bezpečnosti stroje a zabránění toku elektrického proudu. Všechny požadavky splňoval profil nabízený firmou Item: Profil KH dřevo-PP kompozit (Obrázek 33). Nabízí požadované izolační a pevnostní vlastnosti.



Obrázek 33 Rám (3D vizualizace) [vlastní zpracování]

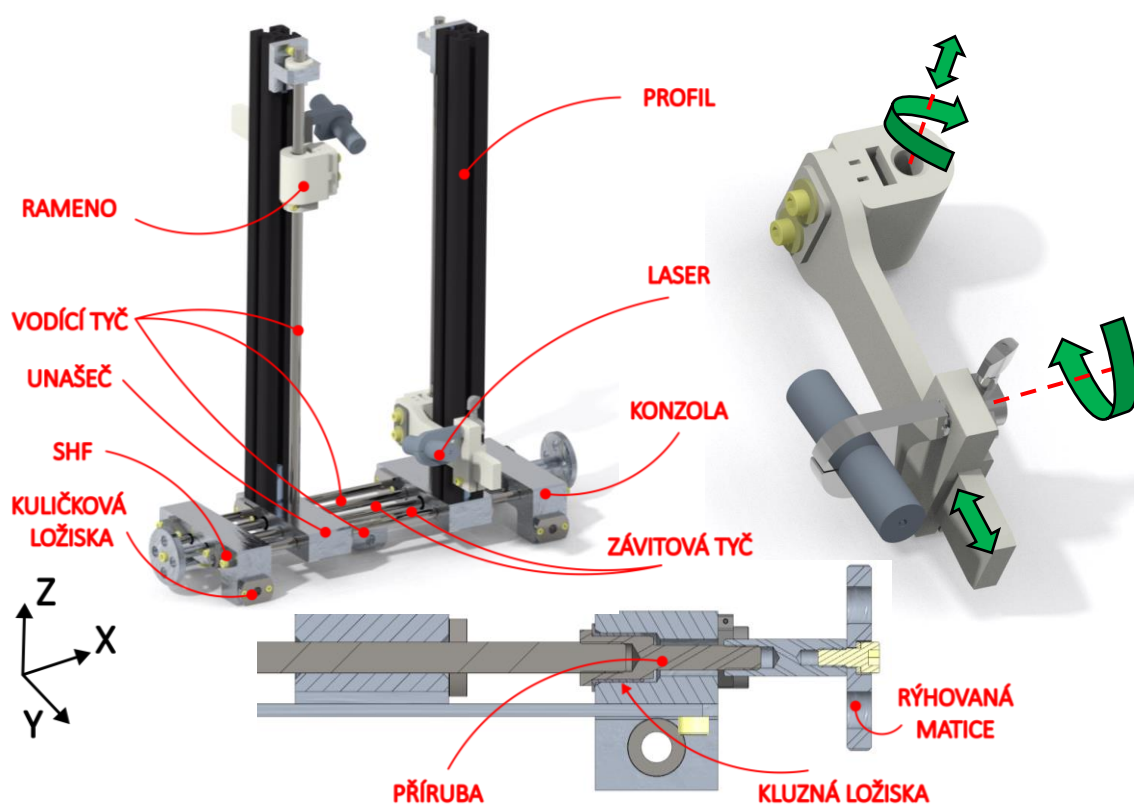
Pro správný výběr množství profilů a jeho příslušenství (rámový systém), byla zpracována veškerá výkresová dokumentace jednotlivých komponentů rámu (v příloze č.1). Na základě této dokumentace proběhla výroba a následná montáž v dílně katedry textilních a jednoúčelových strojů.

Následoval nákup dílů schopných přenést požadované zatížení, a to kuličkových ložisek a vodících tyčí. Nákup závitových tyčí pro přenos rotačního pohybu na lineární, Průša filamentů z materiálu PLA (bude využit na výrobu držáku akčních členů), kluzných ložisek pro uchycení vodících tyčí ve vyráběných konzolách, uchycení vodících tyčí pomocí typu FGWH a SHF a veškerý spojovací materiál (šrouby, matice, podložky, ...). Jako polotovar a materiál revolverové hlavy a hlavního ramene, které musely být z elektricky nevodivého materiálu (nesmí přenášet elektrický proud do kostry rámu), byla zvolena Polyethylenová tyč o průměru 150 mm (PE1000 150-100) a Polyamidová deska (tl. 8 mm a 40 mm). Z nízkých desek bude tvořena základna pro jednotlivé sestavy.

Spojení všech nakupovaných dílců je zprostředkováno vlastními vyrobenými dílci. Tato varianta byla zvolena z důvodu specifického designu stroje a absence využitelných komponentů na trhu. Materiál a polotovar vyráběných dílců byl zvolen hliníková tyč plochá 150x40-1500 (materiál AW 6063 T66 EN 755-1,2,5). Hliníkový polotovar byl zvolen z důvodu jeho nízké hustoty a tím pádem i hmotnosti celkového stroje.

8.1 SESTAVA LASERŮ

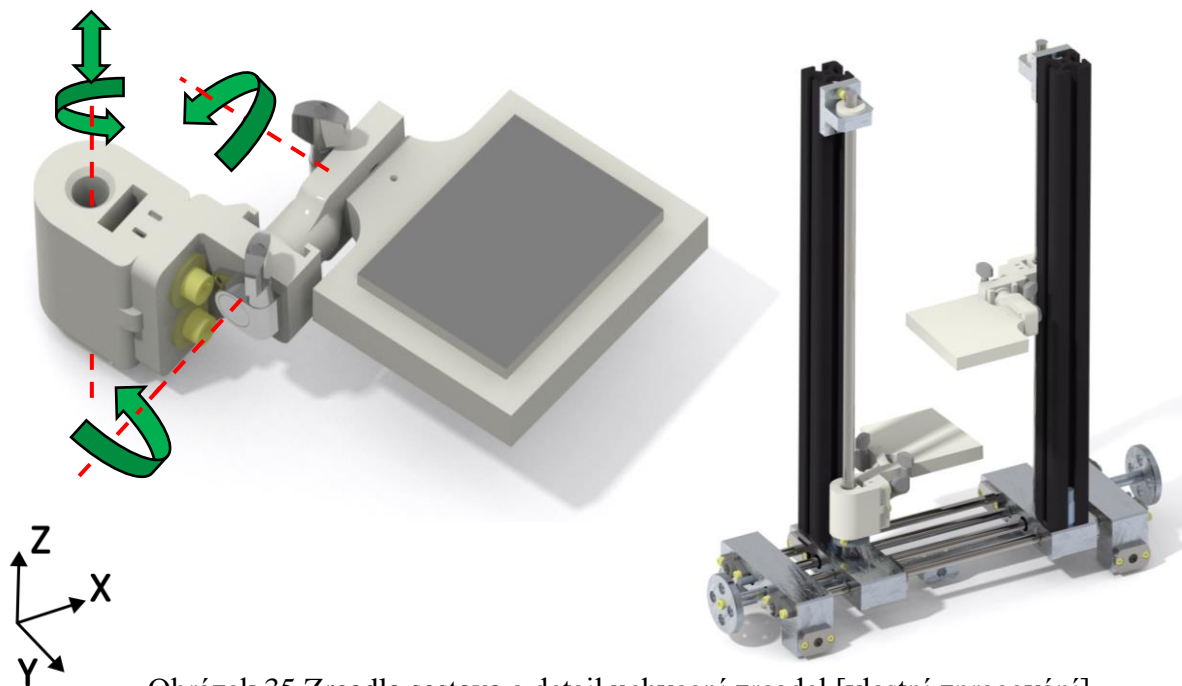
Sestava laser (Obrázek 21) a její konstrukce s naznačeným řezem je na zobrazena na následujícím obrázku (Obrázek 34). Skládá se ze dvou konzolí, jejichž účel je uchycení vodičích a závitových tyčí pro posuv v ose X a zároveň jako hlavní support na podélném posuvu (osa Y). Do konstrukce jsou nalisována kuličková ložiska (osa Y), dále jsou ke konzoli přichyceny díly pro uchycení vodičích tyčí SHF, zalisována kluzná ložiska pro ustavení závitových tyčí (na koncích závitových tyčí jsou zašroubovány příruby, které jsou v kontaktu s kluznými ložisky). V neposlední řadě rýhovaná matice, připevněné k přírubám ke snadnému otáčení závitových tyčí a posuvu jednotlivých sekcí. Sekce se skládají z unašečů osazenými kuličkovými ložisky, profily pro vyztužení, vodičích tyčí pro osu Z a rameny nesoucí lasery.



Obrázek 34 Laser sestava, řez a detail uchycení laserů [vlastní zpracování]

8.2 SESTAVA ZRCADEL

Sestava zrcadla (Obrázek 21) je koncipovaná stejně jako sestava laserová (kapitola 8.1). Funkce jednotlivých závitových a vodících tyčí jsou totožné. Jediný rozdíl je v typu akčního členu. V tomto případě je sestava osazena zrcadly pro nasměrování odraženého světla od hladiny. Vodící tyče pro osu Z jsou uchyceny v konzolích pevně spojených s profily. Mezi tyto tyče a samotnou konzoli je nalisováno pouzdro vytisknuté na 3D tiskárně. Konstrukce sestavy je naznačena na následujícím obrázku (Obrázek 35).



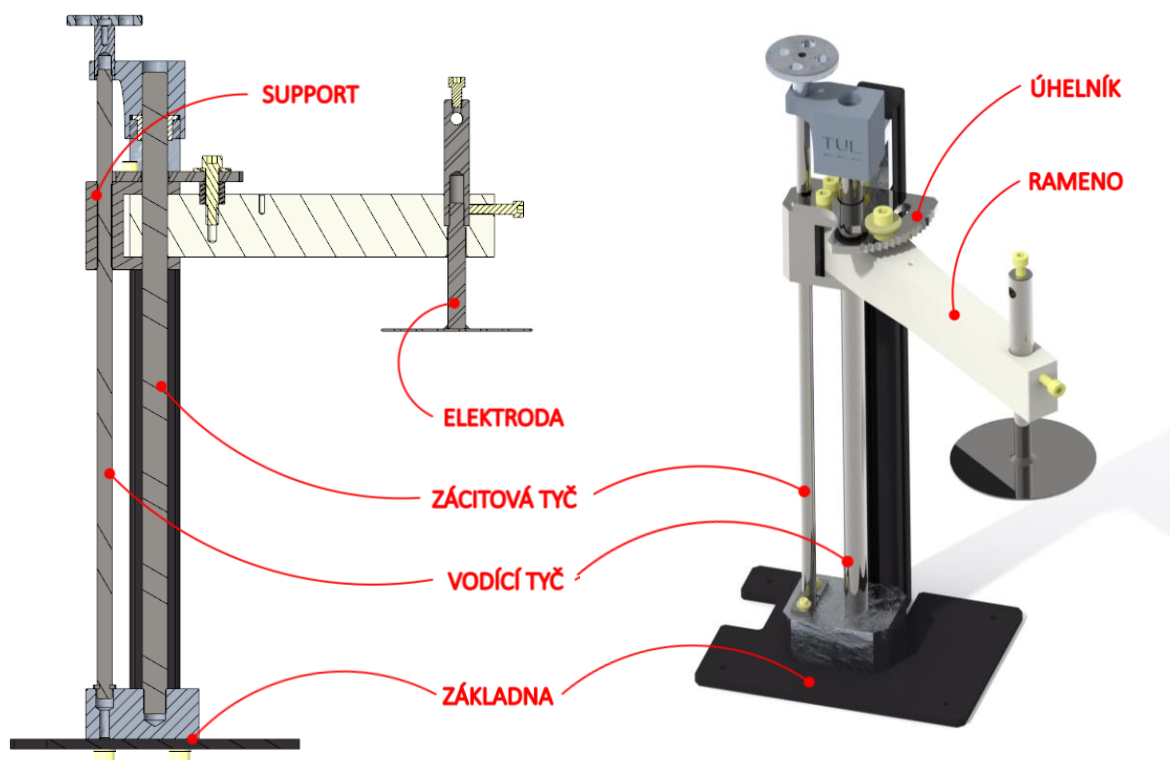
Obrázek 35 Zrcadla sestava a detail uchycení zrcadel [vlastní zpracování]

8.3 SESTAVA ELEKTRODY

Elektroda sestava (Obrázek 21), zobrazená na následujícím obrázku (Obrázek 36) je usazená na hlavní vodící tyči, která je připevněna na spodní desce na základně. Vodící tyč je následně uchycena stejně jako předchozí sestavy v konzoli, která je pevně spojená s profilem. Mezi vodící tyč a konzoli je opět nalisováno pouzdro vytisknuté na 3D tiskárně. Posuv je zajištěn prostřednictvím závitové tyče, která je též uložena v základně. Základna má na konci zápch, do kterého se zasunou destičky uchycené na základně. Destičky zamezí závitové tyči axiální pohyb a zůstane jí pouze volný pohyb rotační. Komponent nazván jako Support je vyráběný dílec, který má vnitřní závit a posouvá se po závitové tyči libovolně v ose Z. Při tomto pohybu zároveň unáší hlavní rameno, které se posouvá po vodící tyči. Současně se s těmito díly posouvá

úhelník, jejíž účel je nastavení požadovaného úhlu ramene. Na konci tohoto ramene se nachází zalisované pouzdro (v pouzdře se nachází díra pro přivedení vodiče do sestavy), do kterého je našroubovaná elektroda. Konstrukce tak nabízí jednoduchou výměnu elektrody, volbou jemného stoupání závitové tyče i přesné nastavení výšky ramene a jeho úhlu.

Bezpečná minimální povrchová izolační vzdálenost je pro využívané maximální elektrické napětí 150 mm . Rameno je z polyamidové tyče a její povrchová izolační vzdálenost od elektrody k nejbližšímu vodivému komponentu (úhelník) je 170 mm .

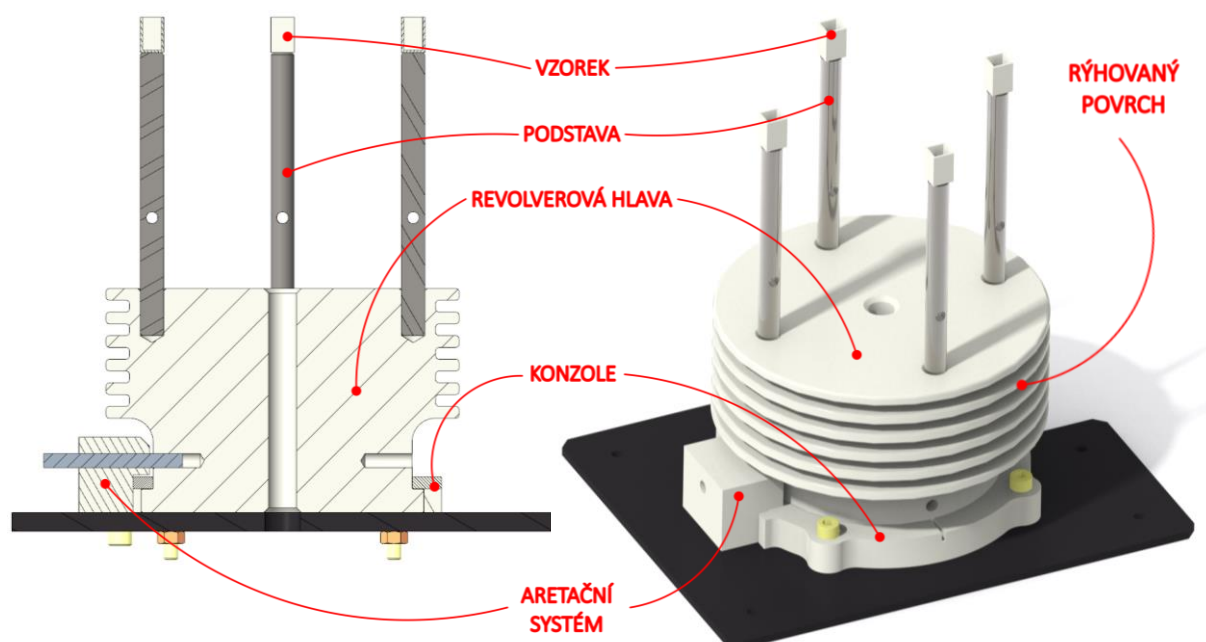


Obrázek 36 Elektroda sestava [vlastní zpracování]

8.4 SESTAVA ROZTOK

Sestava revolver (Obrázek 21), zobrazená na následujícím obrázku (Obrázek 37) poskytuje rychlou výměnu zkoumaných polymerních roztoků. Sestava stojí na polyamidové desce. K ní je uchycena konzole, jejíž účel je ustavení revolverové hlavy do osy a zároveň poskytnutí volného rotačního pohybu. Revolverová hlava je vysoustružena a design zahrnuje neobvyklý rýhovaný povrch. Tato geometrie plní účel zvýšení povrchové izolační vlastnosti. Revolverová hlava má povrchovou izolační vzdálenost $152,27\text{ mm}$ (vyšší než při maximálním napětí, která se rovná 150 mm). Na desce se nachází aretační systém, který zasunutím kolíku

do otvoru aretuje hlavu do přesné pracovní pozice. Vysunutím aretačního kolíku lze hlavu natočit na požadovaný polymerní roztok a nastavit jí do přesně definované pracovní polohy. Podstava je tvořená z ocelové tyče a je uchycená v revolverové hlavě. Na těchto tyčích jsou přilepeny nádoby pro polymerní roztoky. Záporný vodič bude přiveden kabelem do připravené radiální díry v podstavě.



Obrázek 37 Roztok sestava [vlastní zpracování]

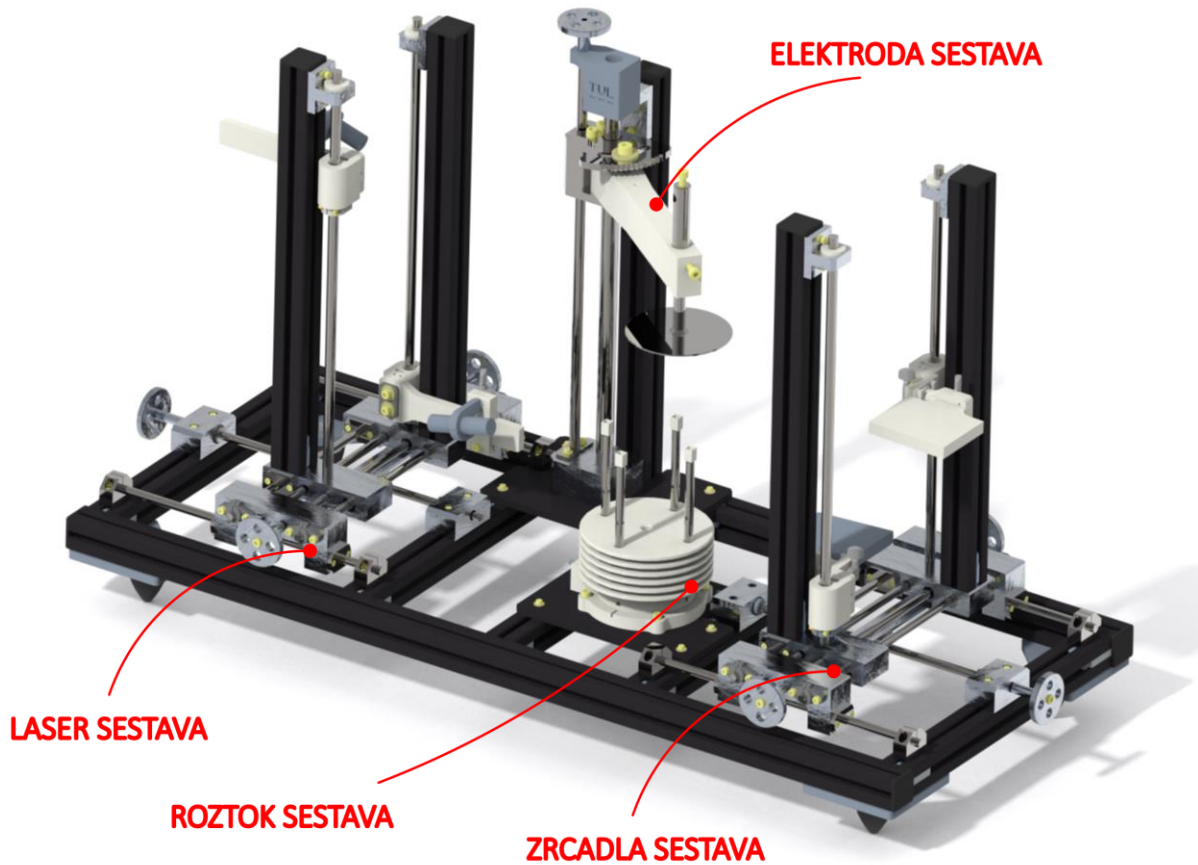
8.5 CELKOVÁ SESTAVA LABORATORNÍHO PŘÍSTROJE

Na následujícím obrázku (Obrázek 38) je znázorněn celý laboratorní přístroj. Jednotlivé sestavy jsou uchyceny na přesně definované místo na rámu. K tomu byly využity drážky v profilech a speciální T-úchytky. Vybrané silentbloky jsou uchyceny na deskách připevněných zespodu na rámu. Nastavitelnost výšky těchto tlumících elementů je klíčové pro uvedení celkového přístroje do vodorovné polohy. Přesná vodorovná poloha je nezbytná ke správnému nastavení zařízení a zobrazení správných výsledků.

Jelikož se jedná o přístroj pro laboratorní a experimentální využití, nebezpečí úrazu proudem od elektricky nabitých součástí je vysoká. Izolace všech komponentů a zároveň zachování kompaktní velikosti celého přístroje je v řešeném případě nereálná. Ze zvýšené míry rizika úrazu elektrickým proudem vyplývá, že obsluha musí být minimálně znalá veškerých nebezpečí, které při práci s přístrojem mohou nastat. Vyvinuté zařízení je určeno pro laboratorní podmínky, do kterých je omezen přístup jen pro povolené a odborně znalé osoby. V rámci této

diplomové práce bude navrhnout celkový laboratorní bezpečnostní rám, který umožní bezpečnější provoz.

Z důvodu časových, a hlavně finančních prostředků zůstane návrh bezpečnostního stanoviště pouze na bázi návrhu a samotná konstrukce rámu bude realizována v další výrobní etapě.

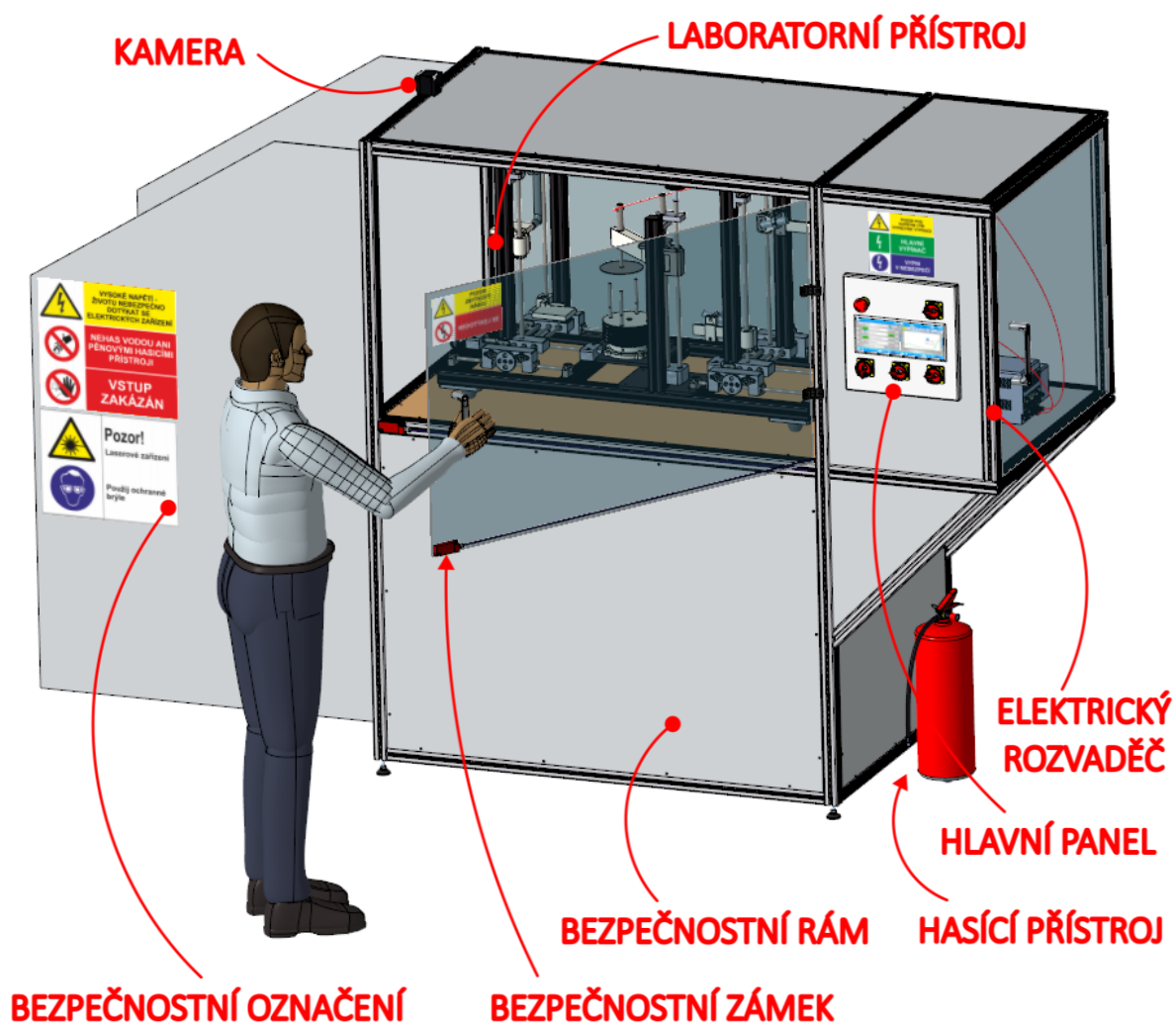


Obrázek 38 Návrh laboratorního přístroje [vlastní zpracování]

9 NÁVRH STANICE LABORATORNÍHO STROJE

Bezpečnostní problematika, uvedená v předchozí kapitole (kapitola 8.5), zdůraznila nezbytnost důkladné opatrnosti při práci s navrhovaným laboratorním přístrojem. Vzhledem k práci s vysokým elektrickým napětím existuje vysoká pravděpodobnost úrazu člověka.

Tato práce dále předkládá návrh celkového stanoviště pro laboratorní přístroj, který obsahuje všechny možné bezpečnostní aspekty, které dovolí i důkladně neproškolené obsluze s tímto strojem operovat. Na obrázku níže je tento navrhovaný koncept naznačen (Obrázek 39). V následujících odstavcích budou dále jednotlivé komponenty popsány.



Obrázek 39 Návrh bezpečnostního rámu [vlastní zpracování]

Bezpečnostní rám je složen z typizovaných hliníkových profilů a tvoří obálku celkového laboratorního stroje. Zároveň je zajištěna díky těžké a robustní podstavě pod strojem vyšší tuhost, hmotnost a tím pádem vyšší citlivost vůči vnějším vibracím. Buzení vnějším mechanickým kmitáním je též pohlceno pomocí speciálních anti-vibračních stavěcích nožek pod strojem. Napravo od stroje se nachází prostor, pro veškerou elektroinstalaci (bude popsáno v dalším odstavci). Dalším důležitým prvkem rámu jsou kryty vlevo od naznačené obsluhy. Kryty se nachází na pracovní straně laboratorního přístroje, z kterého vychází odražené světlo (povrch polymerního roztoku). Zabraňuje tak vstupu osob a možnému kontaktu a úrazu očí obsluhy.

Elektrický rozvaděč je zařízení pro veškerou elektroinstalaci. Jedná se tak o řídicí jednotku, která je přímo napojená na ovládací panel, zdroj vysokého napětí pro laboratorní přístroj, zdroj elektromagnetického záření (laserů), veškeré bezpečnostní jističe a proudové chrániče, atd ...

Hlavní panel je napojen na řídicí jednotku a usnadní tak ovládání přístroje obsluhou. Zároveň dodává aktuální obraz zachycený kamerou. Odstraní nutnost ovládat zdroje napětí a veškerou elektroniku v bezpečné vzdálenosti.

Kamera usnadňuje práci obsluhy a zabraňuje možným vznikům úrazu. Obsluha má možnost zachytit vyzářený odraz hladiny pomocí kamery a aktuální obraz vidět na panelu ovládání, nebo si záznam uložit a následně ho předat na analýzu.

Bezpečnostní zámek je nedílnou součástí bezpečnosti stroje. Zabraňuje tak nebezpečné otevření hlavních dveří rámu a zároveň probíhajícímu testování a průchodu vysokého elektrického proudu. V řešeném případě je vhodné použít magnetický zámek, který je pro podobné případy běžně používán. Bezpečnostní systém je nastaven tak, že při otevření jakýchkoliv dveří při testování dojde k okamžitému odpojení zdroje napětí.

Bezpečnostní označení (výstrahy) jsou na rámu nalepeny z důvodu zabránění nepovoleného způsobu užívání laboratorního stroje.

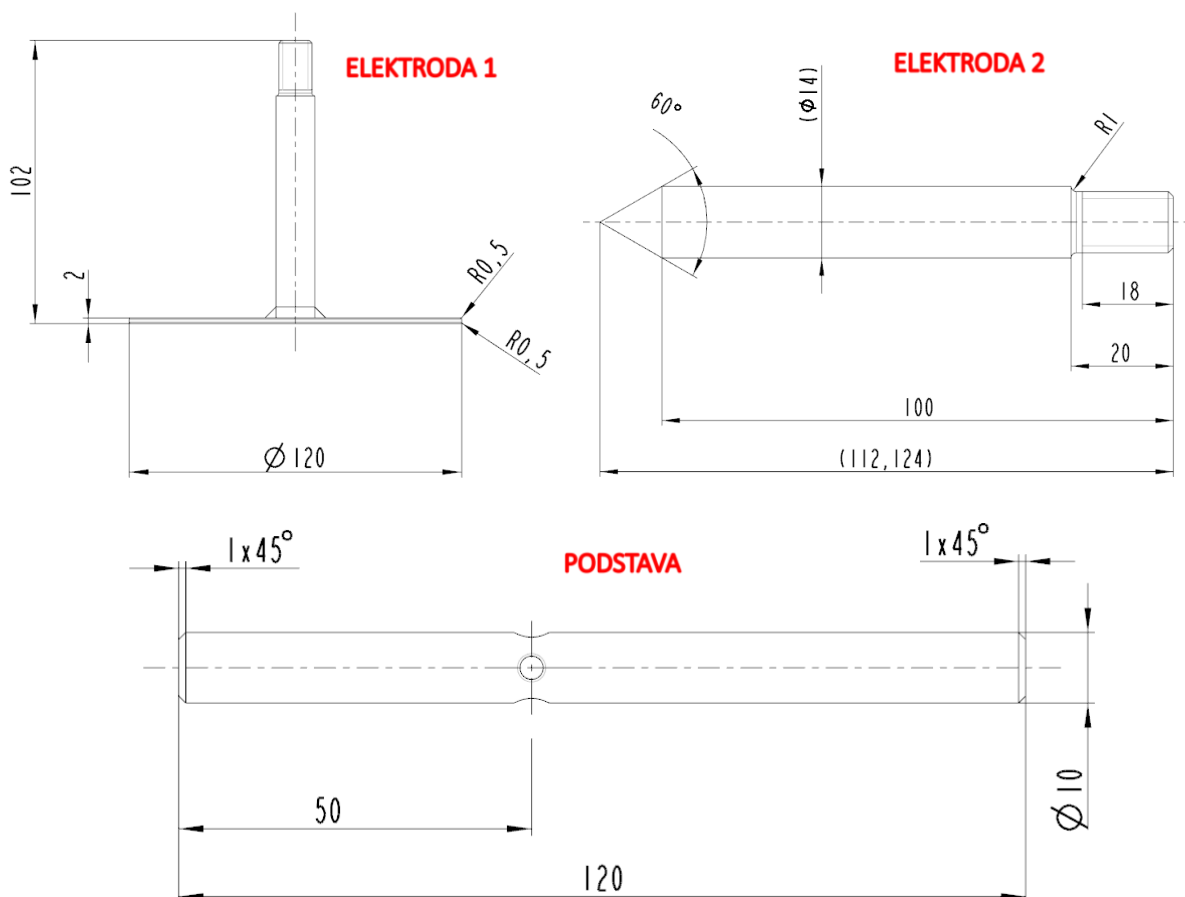
Hasicí přístroj je součástí stroje a umožňuje rychlý zásah při poruše a možného požáru celého zařízení.

10 ROZLOŽENÍ INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE

V rámci přesné analýzy povrchového napětí, změny a veškerého pohybu povrchových vln je nezbytné znát velikost a směr intenzity elektrického pole v blízkosti a okolí zdrojů napětí. Pro zkoumání chování elektrického pole byl využit software Ansys Electronics, pomocí kterého lze hodnoty vypočítat a provést i citlivostní analýzu pro změnu polohy elektrody a podstavy vůči sobě. V následující kapitole bude popsán tvar a tvorba elektrody v tomto softwaru.

10.1 NÁVRH ELEKTRODY A PODSTAVY

V rámci zkoušek funkčního modelu laboratorního přístroje, byly vyzkoušeny různé tvary a rozměry elektrod. Navržené zařízení zahrnovalo volbu dvou různých typů elektrod, které může obsluha laboratorního přístroje upnout a použít. Konstrukční zpracování je uvedeno na následujícím obrázku (Obrázek 40).



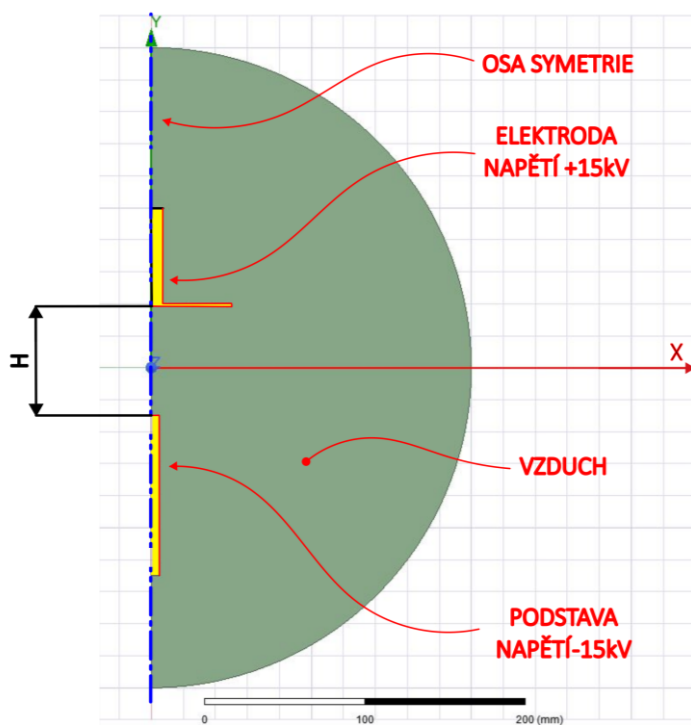
Obrázek 40 Konstrukce elektrody a podstavy [vlastní zpracování]

Talířová elektroda (elektroda 1), u níž se očekává vysoká intenzita v oblasti vnějšího průměru, vyplní rozsáhlejší prostor elektrickým polem. Druhá zvolená elektroda (elektroda 2) bude hrotová. Předpokládá se (fyzikální podstata intenzity elektrického pole a její gradient potenciálu), že bude mít největší intenzitu právě na hrotu, kterým lze působit na přesně zvolené místo (nádobu). Poslední částí simulace je podstava, ustavující zásobník se zvláknovacím roztokem. Zároveň se v ní nachází otvory pro aretaci kabelu pro přívod zdroje elektrické energie.

10.2 MATEMATICKÝ MODEL ELEKTRODY A PODSTAVY

Pro správnou interpretaci výsledků je nutné definovat korektně všechny okrajové podmínky, které přiblíží simulaci co nejvíce realitě. Jelikož jsou oba komponenty rotačně symetrického tvaru, pro usnadnění a zrychlení simulace byla zvolena axisymetrická 2D úloha. Osa symetrie je zvolena jako osa obou komponent (elektroda a podstava). V softwaru byl vymodelován tvar okolí a elektrod a materiál nastaven na „vzduch“ ($EP=1kV/mm$). Síť byla lokálně zahuštěna v okolí exponovaných ploch elektrody a podstavy. Stejnosečný el. proud byl přivezen na hrany obou komponentů, a to konkrétně na elektrodu kladné napětí o hodnotě $15kV$ a na podstavu záporné napětí $-15kV$. Dle vzorce je napětí mezi těmito body vypočteno (2.2.6).

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = 15 - (-15) = 30kV \quad (10.2.1)$$



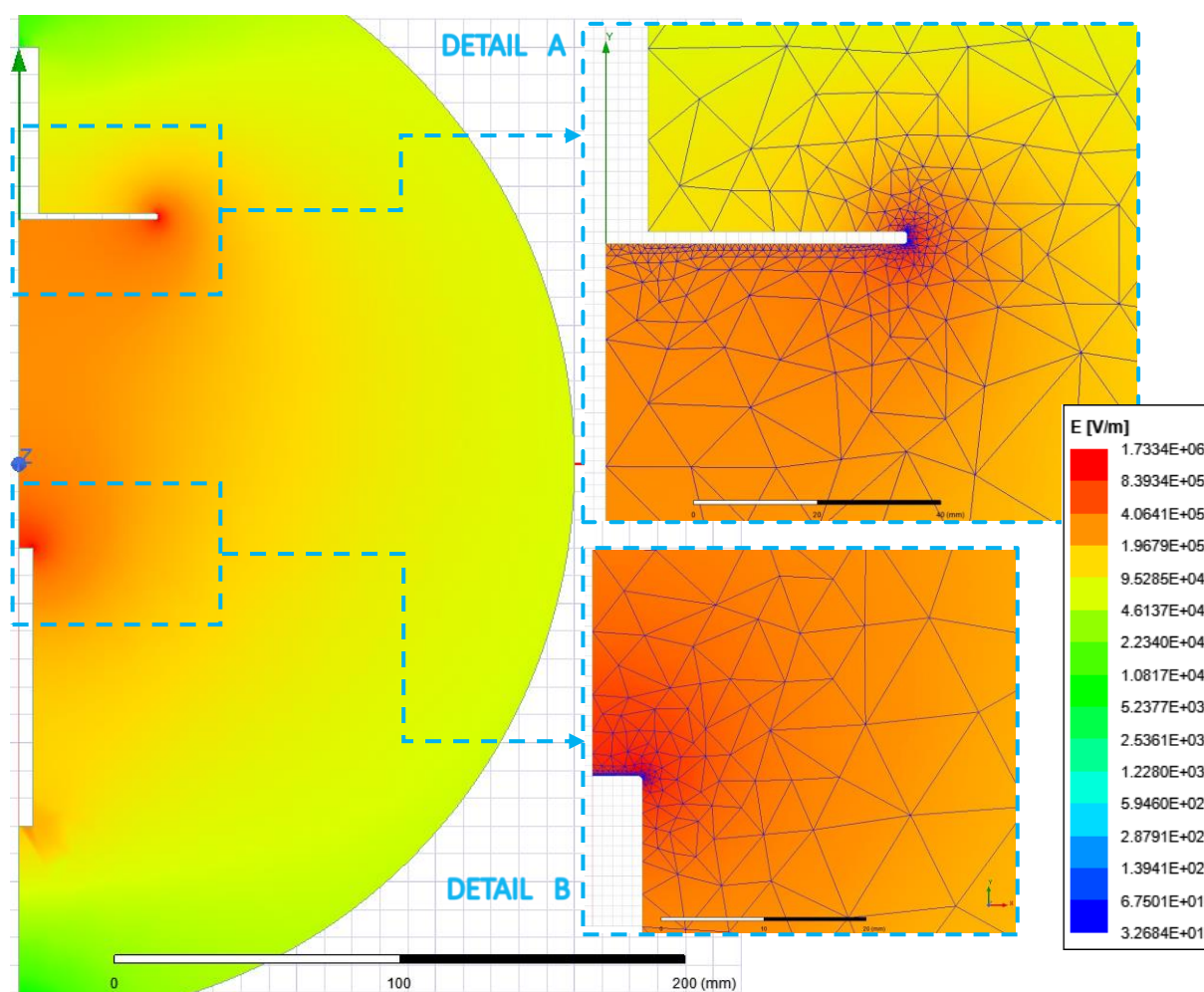
Obrázek 41 Nastavení simulace [vlastní zpracování]

Vzdálenost mezi body (H) byla nastavena jako parametrická pro následnou analýzu závislou na vzdálenosti komponentů od sebe. Schéma nastavení je naznačené na předchozím obrázku (Obrázek 41).

Je nutno podotknout, že na podstavě se bude nacházet zásobník s polymerním roztokem. Z důvodu zjednodušení simulace a nemožnosti znát přesné hodnoty na hranách zásobníku byla tato část sestavy zanedbána. Na předpokládaný výsledek přibližné hodnoty intenzity elektrického pole by to vliv mít nemělo.

10.3 VÝSLEDKY ANALÝZ

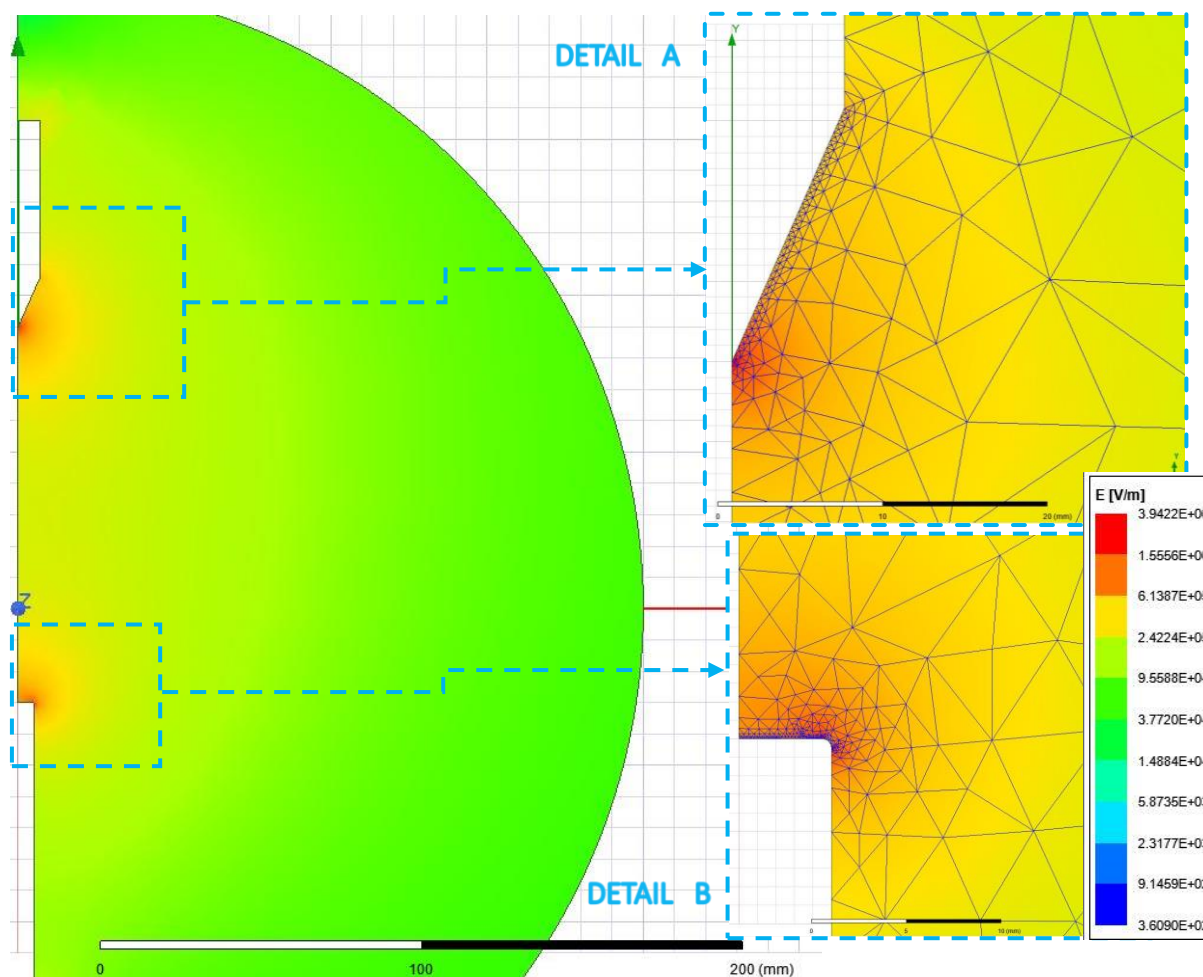
V první řadě proběhla analýza obou konstrukcí elektrod (talířové a hrotové) pro rozměr vzdálenosti $H=120\text{ mm}$. Výsledky (v logaritmickém zobrazení intenzity) společně s jednotlivými detaily míst zájmu jsou zobrazeny na obrázcích níže (Obrázek 42, Obrázek 43).



Obrázek 42 Výsledek analýzy talířové el. pro $H=120\text{ mm}$ [vlastní zpracování]

V detailu A je naznačena talířová elektroda, u které se největší intenzita elektrického pole nachází na hranách talíře.

Na detailu B je přiblížena hrana podstavy, která má největší intenzitu na hraně.

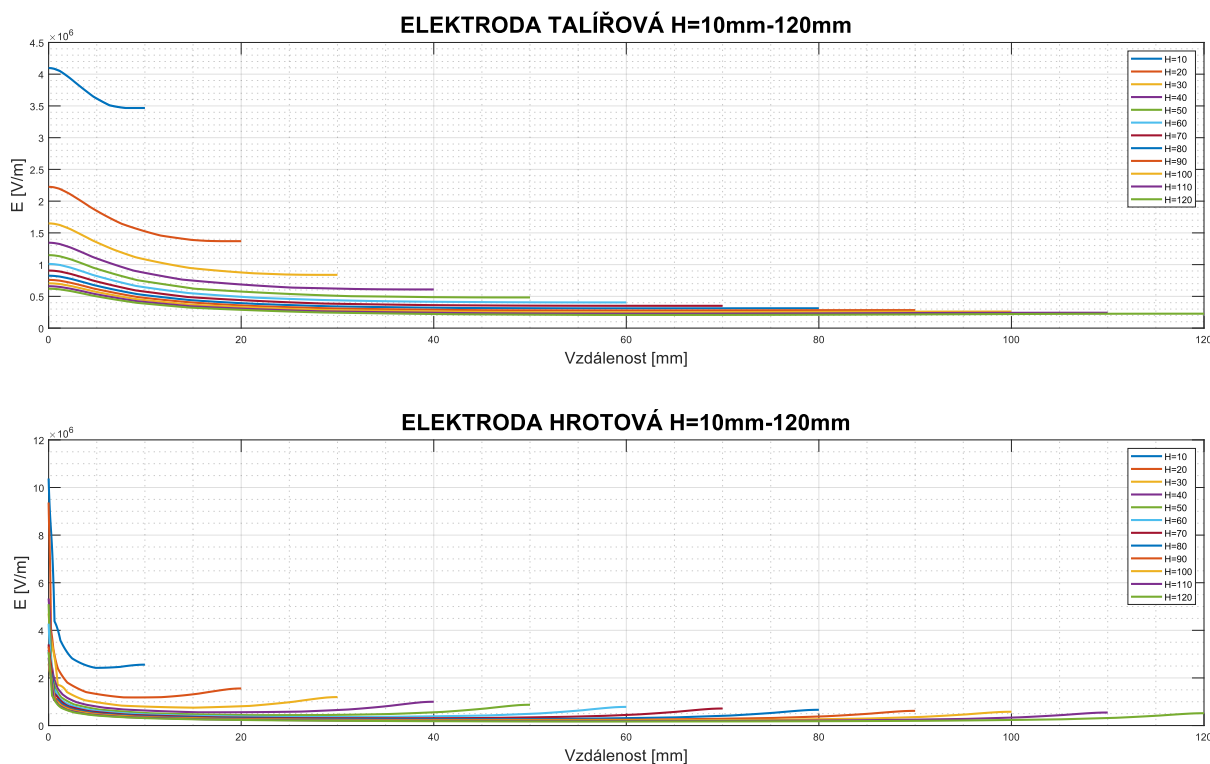


Obrázek 43 Výsledek analýzy hrotové el. pro $H=120$ mm [vlastní zpracování]

Detaily A a B u hrotové elektrody poukazují na stejné fakty, jako předchozí případ. Největší intenzita se akumuluje u hran, nebo rapidní změny geometrie (netečné hrany). Tento fakt vychází ze samotné podstaty intenzity elektrického pole a jeho výpočtu gradientu potenciálu (popsáno více v kapitole 2.2).

Z výsledků je patrná vysoká koncentrace intenzity elektrického pole na hranách talířové elektrody a na špičce hrotové elektrody. Na hladinu polymerního roztoku by tak měla působit intenzita přibližně $E=300$ kV/m (v případě talířové elektrody a $H=120$ mm) a přibližně $E=500$ kV/m (v případě hrotové elektrody a $H=120$ mm).

Následovala řada simulací pro různé velikosti parametru $H_1=10\text{ mm}$ po 10 mm až do vzdálenosti $H_2=120\text{ mm}$. Cílem této analýzy bylo zjistit závislost poloh kladných a záporných pólů (elektroda a podstava) na hodnotě intenzity elektrického pole. Výsledky jsou uvedeny do grafů zpracovaných v softwaru Matlab R2023b v následujícím obrázku (Obrázek 44).



Obrázek 44 Graf závislosti hodnoty H na intenzitě el. pole [vlastní zpracování]

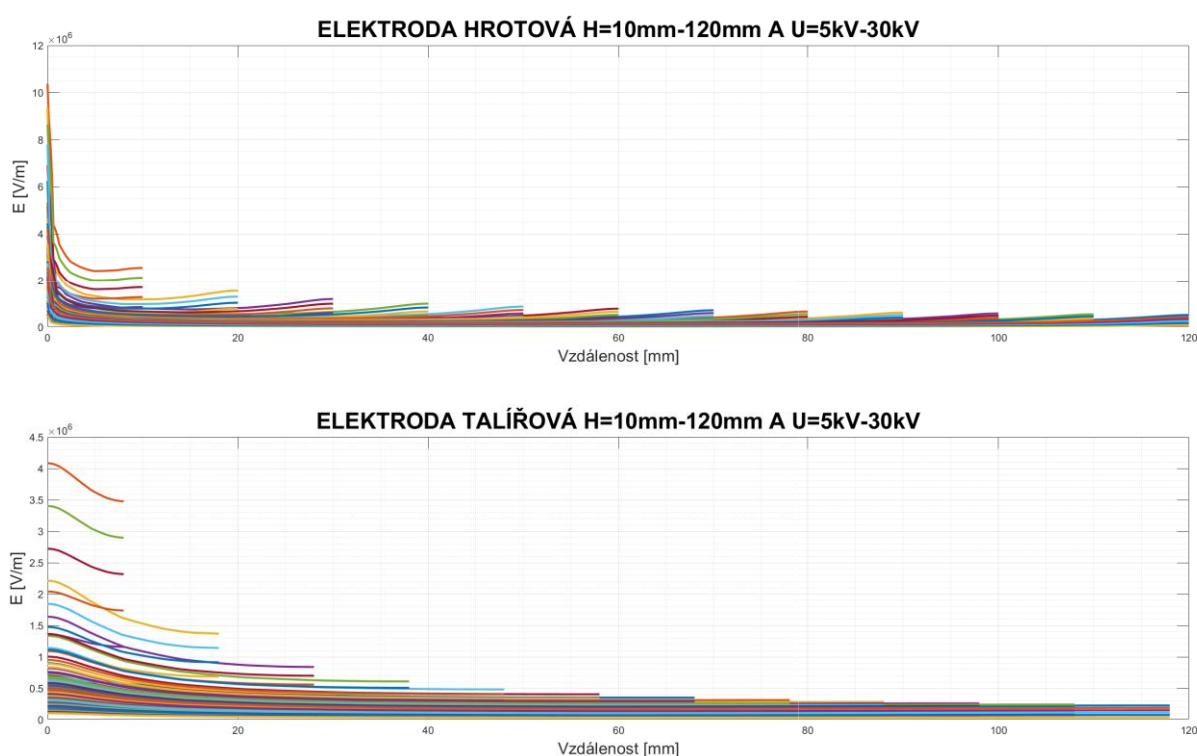
Z předchozího obrázku je patrné, že vzdálenost má na změnu intenzity obrovský vliv. Barvami v grafu jsou naznačeny různé vzdálenosti (možno číst z legend grafů). Na ose Y ($x=0\text{ mm}$) je u obou grafů místo u elektrody. Místo, kde křivka končí je hodnota na podstavě. Uživatel tak může pro jednotlivé vzdálenosti odečíst hodnoty, avšak je nutné podotknout, že nejdůležitější bude hodnota právě na elektrodě (bude ovlivňovat pozorovaný vzorek). V následující podkapitole bude vytvořen přehlednější graf pro snadnější odečítání hodnot intenzity elektrického pole.

Na grafu Elektrody talířové je možné zpozorovat velký rozdíl mezi vzdáleností $H=20\text{ mm}$ a $H=10\text{ mm}$. Intenzita na straně podstavy tak stoupne z hodnoty intenzity elektrického pole $E=1400\text{ kV/m}$ na hodnotu $E=3500\text{ kV/m}$. Je nutné upozornit, že na tyto vzdálenosti pravděpodobně proběhne průraz mezi elektrodami. K průrazu dojde při překročení určité kritické hodnoty intenzity elektrického pole (**elektrická pevnost**).[21]

Na druhém grafu lze pozorovat poměrně velký nárůst na straně elektrody (hrot) oproti místu podstavy. Na této straně se intenzita na druhou stranu zvyšuje lineárněji než u talířové.

10.4 ANALÝZA INTENZITY EL. POLE PRO RŮZNÉ NAPĚTÍ

V předchozí podkapitole (kapitola 10.3) byly naznačeny grafy (Obrázek 44) pro různé vzdálenosti mezi elektrodou a podstavou. Je nezbytné provést tuto analýzu i pro různé hodnoty napětí (rozdíl potenciálů na elektrodě a podstavě) a zároveň různé vzdálenosti. Zvoleno bylo napětí $U_1=15\text{ kV}$ po 5 kV až na hodnotu $U_2=5\text{ kV}$. Výsledek této simulace je zobrazen na následujícím obrázku (Obrázek 45).



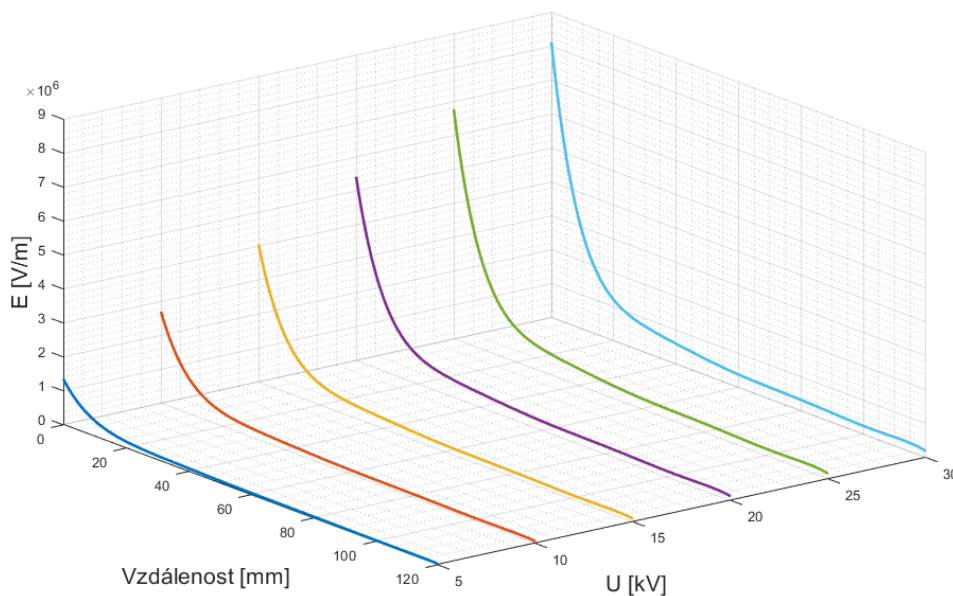
Obrázek 45 Graf závislosti hodnoty H na intenzitě el. pole [vlastní zpracování]

Z předchozího grafu (Obrázek 45) lze pozorovat, že při změně napětí přiváděnému k jednotlivým akčním členům se mění velikost intenzity elektrického pole.

Pro snadnější určení hodnot, které jsou v přímé blízkosti na podstavě, budou vytvořeny nové grafy (jednotlivých elektrod) pro snadné a rychlé odečtení.

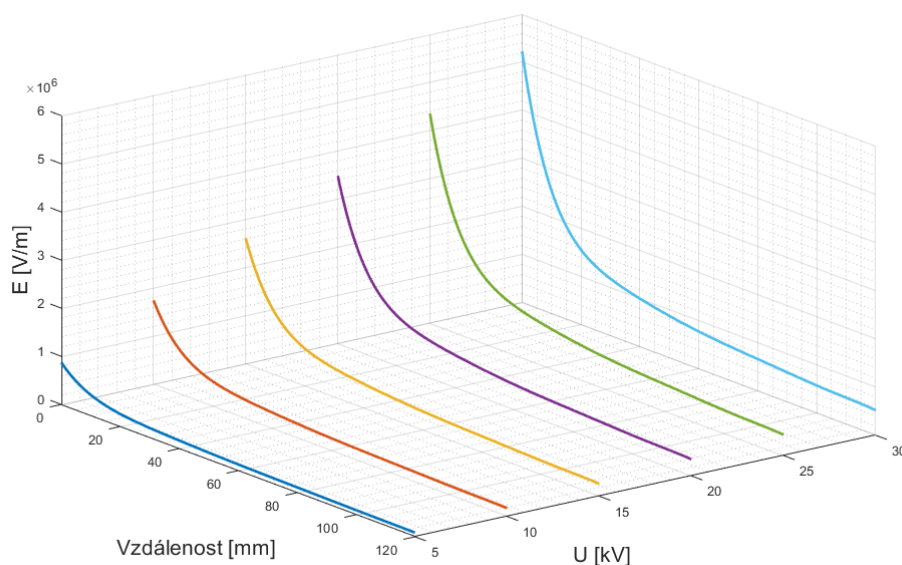
10.5 HODNOTA INTENZITY EL. POLE NA PODSTAVĚ

Hodnoty na podstavě jsou přímo zobrazené do 3D grafu a body jsou proloženy polynomickou funkcí, která dovolí předpokládat neanalyzované hodnoty napětí. Zobrazeno na následujícím obrázku (Obrázek 46). Na ose X a Y je zobrazena závislost intenzity elektrického pole na vzdálenosti elektrody od podstavě. Na ose Z jsou naměřeny pro jednotlivá napětí.



Obrázek 46 Hodnota intenzity na podstavě – TALÍŘOVÁ elektroda [vlastní zpracování]

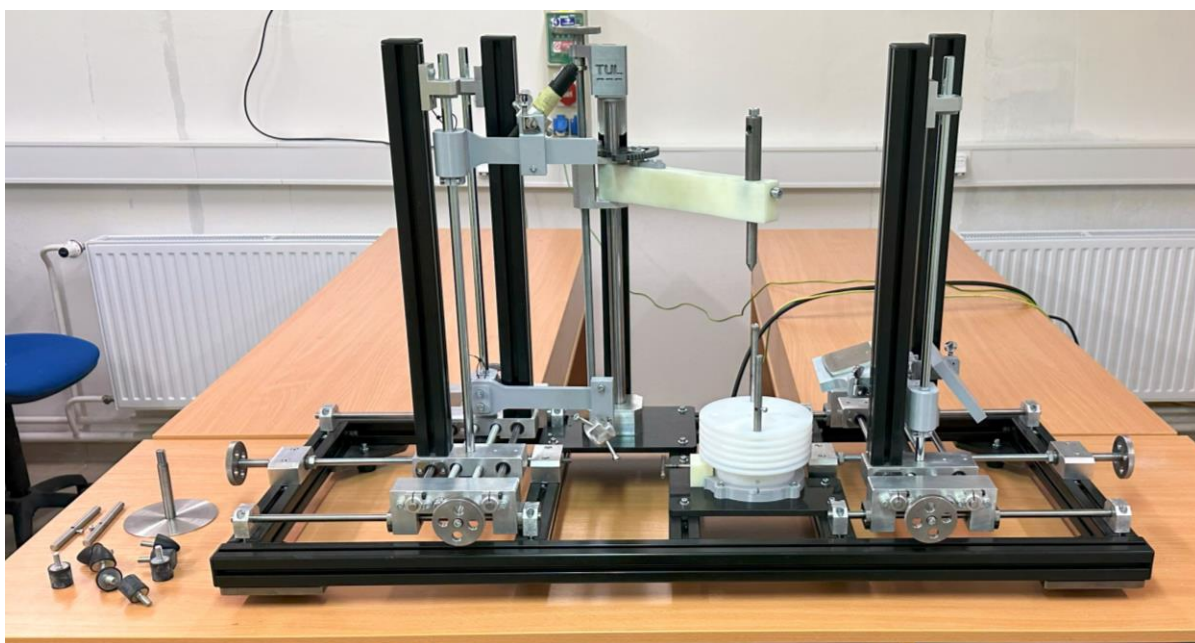
Pro elektrodu hrotovou je stejný graf naznačen na následujícím obrázku (Obrázek 47).



Obrázek 47 Hodnota intenzity na podstavě – HROTOVÁ elektroda [vlastní zpracování]

11 ZKOUŠKA LABORATORNÍHO STROJE

Na základě vývoje laboratorního stroje popsaného v kapitole 8. byla vytvořena veškerá potřebná výkresová dokumentace (přiloženo v příloze č.1). Většina vyráběných komponentů (včetně profilů celého rámu), byla zhotovena v dílně katedry jednoúčelových a textilních strojů specializovaným pracovníkem. Zbylé díly byly zpracovány v externích firmách, nebo pomocí 3D tisku. Na následujícím obrázku (Obrázek 48) je znázorněna finální podoba navrženého laboratorního zařízení.



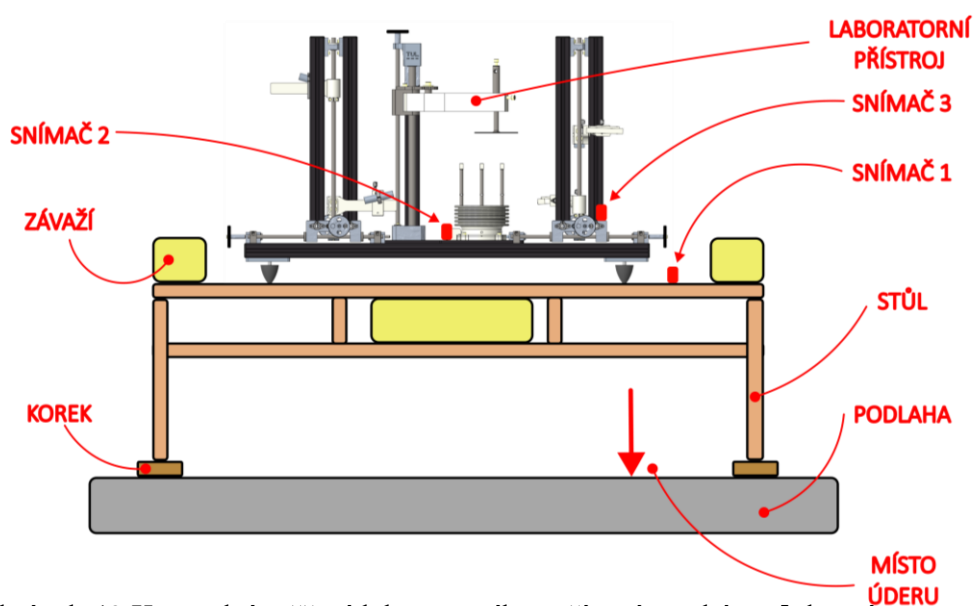
Obrázek 48 Finální konstrukce laboratorního přístroje [archiv autora]

11.1 MĚŘENÍ VIBRACÍ STROJE

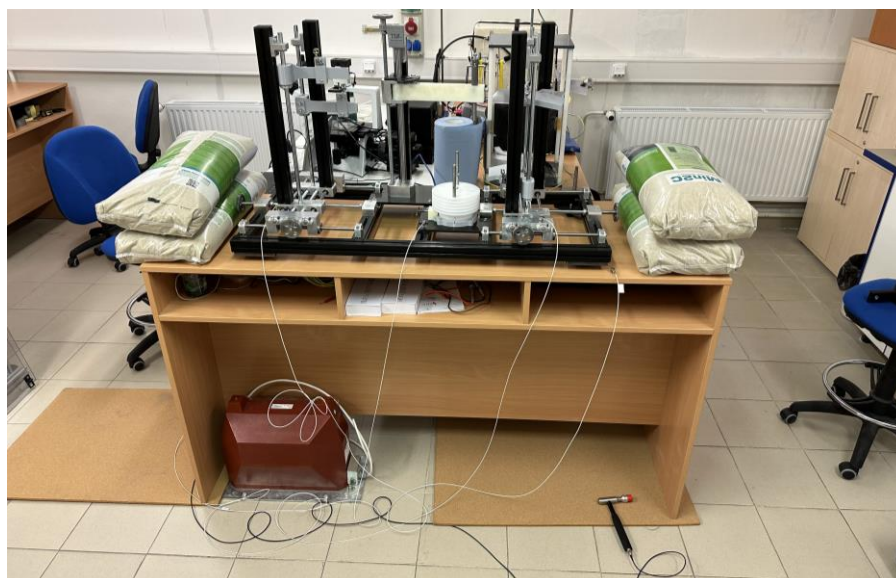
V kapitole (kapitola 6.3) s analýzou měření vibrací bylo zjištěno, jakým způsobem systém reaguje na vnější vibrace. Zároveň byly zjištěny dominantní budící frekvence, které sloužily pro návrh a výběr správných tlumících prvků.

Na určeném a specifickém místě v laboratoři proběhlo opětovné měření vibrací s definovanou budící silou a frekvencí (rázové kladívko) ve spolupráci s katedrou mechaniky, pružnosti a pevnosti (Ing. Michal Sivčák Ph.D.). Tímto způsobem jsme schopni porovnat, zda navržená vibroizolace (kapitola 6.4) plní svůj úkol. Jako porovnávací faktor byla použita efektivní hodnota amplitudy neboli RMS (root mean square).

Proběhly 4 měření se třemi akcelerometry (3 pro zachycení jednotlivých interakcí). První měření bylo realizováno na samotném stole s laboratorním zařízením, bez jakýchkoliv tlumících elementů (pro referenční spektrum). Druhé měření s přidáním korků pod stůl. Korek má dobré tlumící vlastnosti a značnou část energie vnějšího buzení pohltí. Další měření probíhalo s namontovanými silentbloky na laboratorním zařízení. V posledním (zobrazeno na následujícím schématu a reálné fotografii - Obrázek 49 a Obrázek 50) měření bylo do sestavy přidáno zatížení v podobě 4x25 kg písku, který dokáže určitou vnější energii v podobě vibrací utlumit mezi jednotlivými zrny.



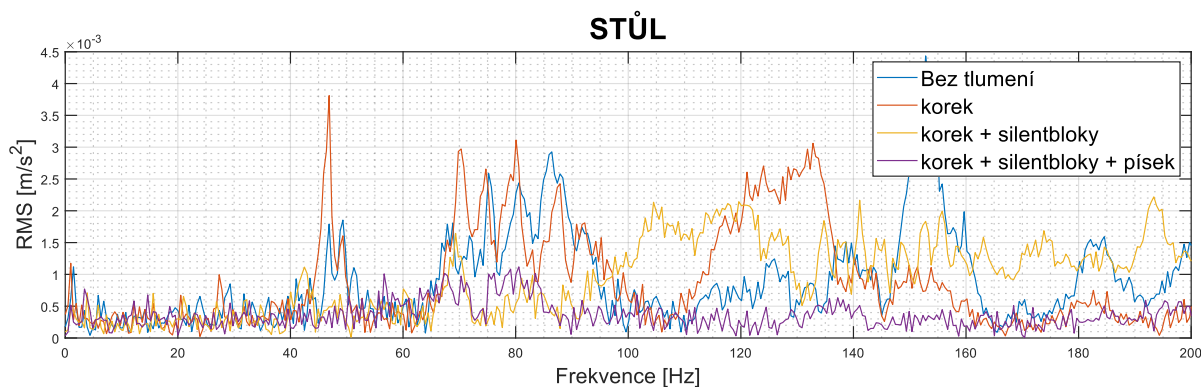
Obrázek 49 Kontrolní měření laboratorního zařízení – schéma [vlastní zpracování]



Obrázek 50 Kontrolní měření laboratorního zařízení [archiv autora]

11.1.1 SNÍMAČ 1

Snímač 1 byl umístěn na pracovním stole. Výsledky měření jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obrázek 51).

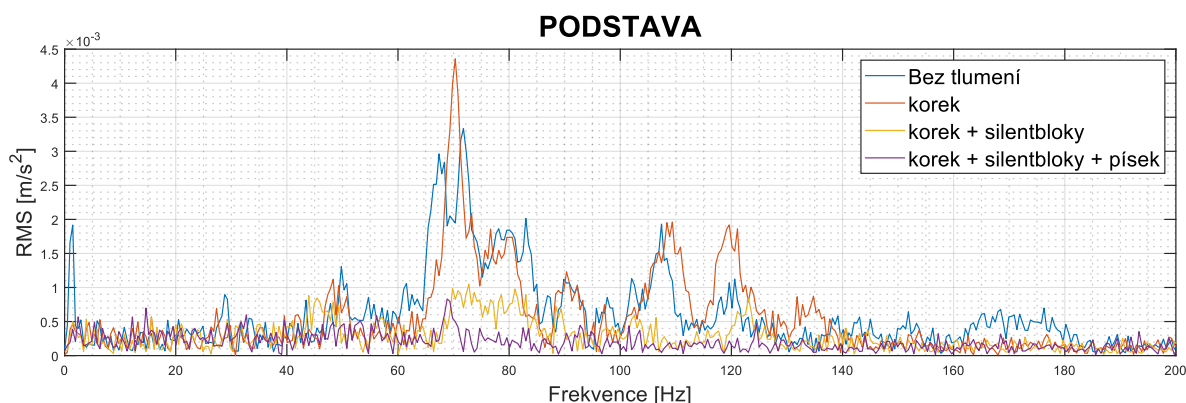


Obrázek 51 Naměřené hodnoty na snímači 1 – stůl [vlastní zpracování]

Z předchozích výsledků (Obrázek 51) je patrné, že přidáním korku do systému se snížila efektivní hodnota amplitudy spíše ve vyšších frekvencích. Naopak v těch nižších dochází k opačnému jevu (zrychlení je v určitých místech vyšší, než stůl samotný). Kombinace korku a silentbloků nevykazuje žádné změny v RMS (silentbloky mají vliv až na laboratorní stroj). Nejlepším řešením je přidání korku, silentbloků a závaží (v podobě písku) do sestavy.

11.1.2 SNÍMAČ 2

Druhý snímač byl umístěn na podstavě laboratorního stroje. Konkrétně na Polyamidové desce, která nese revolverovou hlavu. Výsledky měření jsou zobrazeny níže (Obrázek 52)



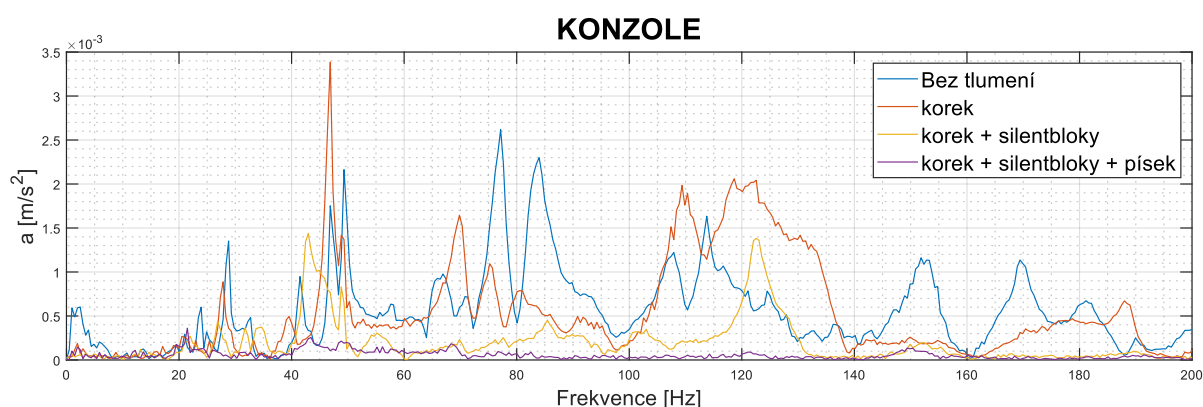
Obrázek 52 Naměřené hodnoty na snímači 2 - podstava [vlastní zpracování]

Z výsledků (Obrázek 52) měření na podstavě laboratorního přístroje je opět patrný vliv korku až ve vyšších frekvencích. Na rozdíl od přechozího případu pohlcují energii i silentbloky,

tím pádem tato kombinace vykazuje dobré vibroizolační vlastnosti (největší hodnota RMS je 3,4krát menší). Nejlepším řešením je opět kombinace korku, silentbloků a přidání závaží.

11.1.3 SNÍMAČ 3

Poslední akcelerometr byl umístěn na konzoli pro X-ový posuv přístroje. Toto místo je důležité, protože s tímto dílcem jsou přímo spojeny vodící tyče ustavující zrcadla a lasery. Výsledek tohoto měření je zobrazen na následujícím obrázku (Obrázek 53).



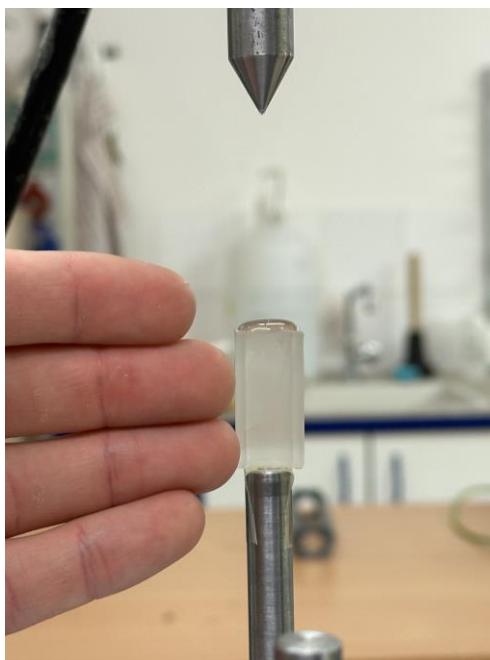
Obrázek 53 Naměřené hodnoty na snímači 3 - konzola [vlastní zpracování]

Měření (Obrázek 53) vykazuje nižší tlumení než na samotné podstavě stroje. Zapříčiněno tím, že se tato konzole nachází na vodící tyči, která se sama chová jako pružina a podstavu zrcadel a laserů dále rozkmitává. Platí pouze pro případ bez silentbloků a závaží. S těmito úpravami lze docílit (patrně z grafu) nižší efektivní hodnoty amplitudy a potlačit nežádoucích vibrace celého laboratorního přístroje.

11.2 ZOBRAZENÍ POVRCHU ROZTOKU

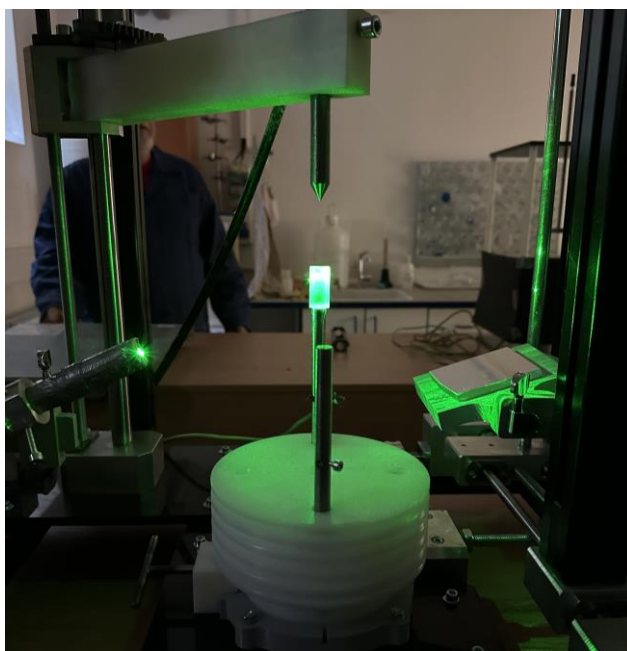
Nedílnou vlastností laboratorního zařízení je schopnost zobrazit povrch polymerního roztoku. Z tohoto důvodu byl proveden test funkčnosti a spolehlivosti zobrazování. Zkouška proběhla na určeném místě v alchymistické laboratoři s navrhnutým tlumícím systémem. Zvolen byl polymerní roztok Polyvinylbutyral (PVB). Sestavy laserů a zrcadel byly nastaveny, aby se výsledný odraz z hladiny promítal na strop. Pro zvýšení viditelnosti výsledků byla ztlumena všechna světla. Měření probíhalo pomocí hrotové elektrody se vzdáleností mezi elektrodou a podstavu 75 mm. Na následujícím obrázku (Obrázek 54) je znázorněn detail měřícího místa i

s polymerním roztokem. Pro zrovnoměrnění povrchových bublinek bylo na vrcholu nádoby vytvořena kapka.



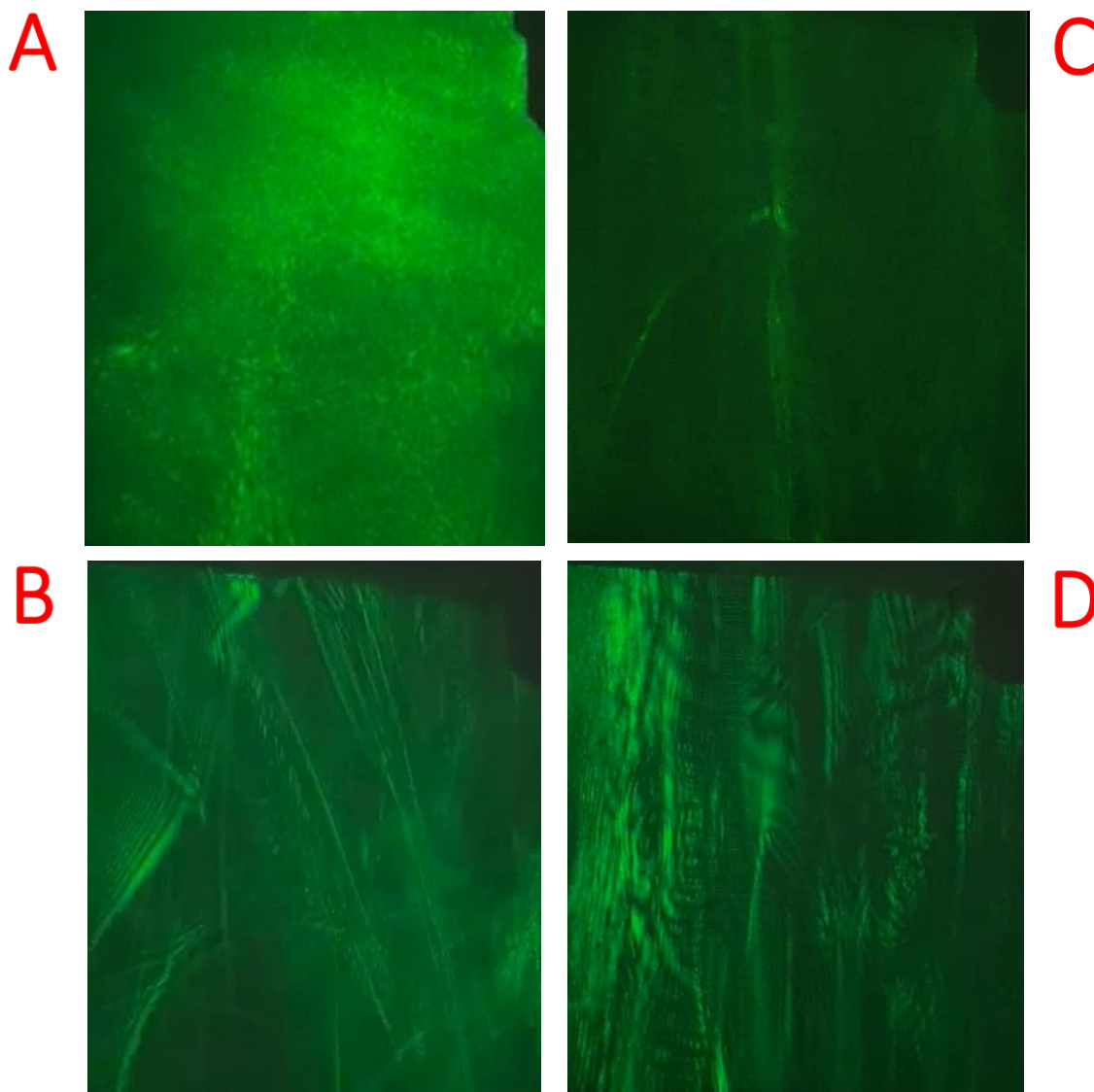
Obrázek 54 Detail pozorovaného polymerního roztoku [archiv autora]

Na obrázku níže (Obrázek 55) je zachycen laboratorní přístroj při prvním testu za použití jednoho laseru a jednoho zrcadla. Obraz byl z prostorového důvodu v laboratoři nasměrován na strop.



Obrázek 55 Laboratorní přístroj při měření [archiv autora]

Na následujícím obrázku (Obrázek 56) je lze vidět pokus o zobrazení hladiny polymerního roztoku bez působení vysokého napětí (Obrázky A a B) a na obrázcích C a D je znázorněn povrch ovlivněný intenzitou elektrického pole. Obrázky A a C jsou zachyceny v případě kapky na povrchu nádoby a obrázky B a D v případě polovičně naplněné nádoby.



Obrázek 56 Náznak chování povrchových vln [archiv autora]

Z předchozích obrázků lze pozorovat vliv intenzity elektrického pole na uspořádanost povrchových vln v polymerním roztoku. Na obrázku A a B je zobrazena hladina bez působení jakéhokoliv elektrického napětí, což naznačuje nepravidelné tvary vln a bublin.

Na obrázcích B a D (rozdíl el. napětí $U=25\text{ kV}$), lze pozorovat paralelní vlny, které se zvyšováním napětí formovaly na hladině a úměrně s tím i rychlost jejich kmitání.

12 ZÁVĚR

Diplomová práce se zaměřuje v současnosti na rychle se rozvíjející téma nanovláknenné struktury a jeho problematiku na rozhraní povrchového napětí. Tyto jevy jsou klíčové pro porozumění procesu elektrického zvláknování. Na základě nápadu pana docenta Pavla Pokorného byla navržena konstrukce laboratorního zařízení, jejímž cílem je usnadnit zkoumání hladinových jevů v polymerních roztocích umístěných v silném elektrickém poli. Zařízení využívající čistě bezkontaktního (netečného k elektrickému poli) zobrazování odrazu elektromagnetického záření od hladiny roztoku a zároveň izolující od nežádoucích vnějších vibrací.

Součástí této práce je rešerše stávajících řešení výroby nanovláknenné struktury, využívající doposud neznámou teorii povrchových vln. Zároveň je zde rozebrána problematika elektrického tlaku a Taylorova kužele. V neposlední řadě se zabývá teorií a způsoby vibroizolací různých konstrukčních celků.

Bezpečnost je nezbytná vlastnost každého navrhovaného stroje, proto se práce zabývá návrhem bezpečnostního rámu. Měřicí stanoviště redukuje riziko nebezpečí tím, že celé zařízení izoluje, přidá vzdálené ovládání elektrické rozvodny a bude vybaveno průmyslovými bezpečnostními prvky

Implementace zařízení do provozu vyžadovala znalost intenzity elektrického pole v místě pozorování. Práce předkládá detailní simulaci intenzity el. pole pro různé vzdálenosti dvou elektricky nabitých částí zároveň pro různé velikosti přiváděného napětí, s důrazem na detailní grafické popsání velikosti intenzity na spojnici elektrody a podstavce.

Problematika vibroizolace byla nezbytnou částí návrhu, neboť bez ní by byla funkčnost přístroje značně ohrožena. V rámci návrhu nejlepšího vibroizolačního efektu bylo provedeno počáteční měření zrychlení. Tímto způsobem bylo zjištěno, jak se dosavadní systém chová při buzení vnějšími vibracemi v podobě pohybu osob v laboratoři. Následoval pečlivý výběr správných pasivních prvků tlumičů vibrací (silentbloků), které dovedou odizolovat stroj se záteží i bez ní. Funkčnost a důkaz správného výběru tlumičů byl proveden druhým měřením na finální konstrukci zařízení. Měření bylo provedeno pomocí rázové kladívka (stejně podmínky buzení pro všechny měření). Výsledné grafy prokázaly funkčnost nejenom silentbloků

na přístroji, ale také korkových vibroizolačních desek, kterými byly podloženy nohy stolu. Největší útlum vibrací nastal při zvýšení hmotnosti systému přidáním pískových pytlů, které mají samy o sobě dobrou disipaci vnější energie.

V práci je prezentována funkčnost zařízení v podobě grafických výstupů (map na odrazu paprsku laseru). Z proběhlých testů bylo vyzorováno chování hladiny v elektrickém poli. Byly vyzorovány paralelní vlny v před kritickým momentu před začátkem tvorby Taylorova kužele – nanovláken. Dalším zajímavým vyzorovaným jevem bylo jejich zvyšování rychlosti kmitání se zvyšujícím budícím napětím. Oproti předběžnému funkčnímu modelu je navrhované zařízení tužší, dodává značně větší možnost nastavení jednotlivých poloh a natočení. Nejdůležitější vlastnost, kterou zařízení disponuje, je opakovatelnost zkoušení.

Je důležité zdůraznit, že laboratorní přístroj není konkrétním technickým řešením, ale představuje podnět k dalšímu zkoumání a inovacím v oblasti pozorování povrchového chování hladiny. Přináší naději přispění k lepšímu porozumění této problematice a posune hranice poznání oboru nejen pro návrh nových zařízení, ale také nalezení prospěšných oblastí využití nanovlákněné struktury.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] EISLER, Dominik. Zvlákňovací zařízení pro výrobu plošného nanovláknenného materiálu. online. 2019-10-14. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/153892>.
- [2] LIN, Tong a Xun gai WANG. *Needleless electrospinning of nanofibers: technology and applications*. Boca Raton: CRC press, 2013. ISBN 978-981-4316-35-4.
- [3] PROF, Rndr Csc Jirsák Oldřich; Filip SANETRŇÍK; Rndr Csc Lukáš David PROF; Václav KOTEK; Csc Martinová Lenka ING et al. *Způsob výroby nanovláken z polymerního roztoku elektrostatickým zvlákňováním a zařízení k provádění způsobu*. PROF, Rndr Csc Jirsák Oldřich; Filip SANETRŇÍK; Rndr Csc Lukáš David PROF; Václav KOTEK; Csc Martinová Lenka ING et al. (vynálezce/vynálezci). Přihl.: 8. 9. 2003. Uděl.: 10. 11. 2004. CZ20032421A3. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/CZ20032421A3/cs?oq=CZ20032421A3>.
- [4] JAN, Valtera. *Moderní technologie pro výrobu nanovláknenných struktur*. (Přednáška). 2022-.
- [5] LUKÁŠ, David. *Nanovláknna: teorie, technologie a použití*. Vydání první. Praha: Academia, 2023. ISBN 978-80-200-3400-7.
- [6] KOCIS@LUBOMÍR; POKORNÝ@PAVEL; LUKÁS@DAVID; MIKES@PETR; @Jirí CHVOJKA et al. *Zpusob výroby polymerních nanovláken zvlákňováním roztoku nebo taveniny polymeru v elektrickém poli a lineární útvar z polymerních nanovláken vytvorený tímto způsobem*. KOCIS@LUBOMÍR; POKORNÝ@PAVEL; LUKÁS@DAVID; MIKES@PETR; @Jirí CHVOJKA et al. (vynálezce/vynálezci). Přihl.: 17. 12. 2012. Uděl.: 13. 11. 2013. CZ304137B6. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/CZ304137B6/cs>.
- [7] SEDLÁK, BEDŘICH A ŠTOLL, IVAN. *Elektrina a magnetismus*. 2. opr. a rozš. vyd. Praha: Academia. ISBN ISBN 80-200-1004-1.
- [8] THIERRY A, Jean-Pierre AIMÉ. *Nanoscale liquid interfaces: wetting, patterning, and force microscopy at the molecular scale*. ISBN 978-981-4316-45-3.
- [9] LUKÁŠ, David. *Physical principles of electrospinning*. ISBN 978-80-7372-508-2.
- [10] PALM, William J. *Mechanical vibration*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2007. ISBN 978-0-471-34555-8.
- [11] BREPTA, Rudolf; František TUREK; Eva KALENSKÁ a Ladislav PŮST. *Mechanické kmitání*. Vyd. 1. Praha: Sobotáles, 1994. ISBN 978-80-901684-8-0.
- [12] PETRÍKOVÁ, Iva. *Kmitání mechanických soustav*. (Přednáška). Liberec, 2022-.

- [13] SIKÁ, Zbyněk. Aktivní a poloaktivní snižování mechanického kmitání strojů. online. Dostupné z: https://www.academia.edu/21898062/Aktivn%C3%AD_a_poloaktivn%C3%AD_sni%C5%BEov%C3%A1n%C3%AD_mechanick%C3%A9ho_kmit%C3%A1n%C3%AD_stroj%C5%AF.
- [14] Passive Vibration Isolation System - Technical Notes. online. In: *DAEIL SYSTEMS*. Dostupné z: <https://www.daeilsys.com/support/technical-notes/passive-vibration-isolation-system/>. [citováno 2023-10-29].
- [15] ESCUDIER, Marcel. *A dictionary of mechanical engineering*. New York, NY: Oxford University Press, 2019. ISBN 978-0-19-883210-2.
- [16] REITHERMAN, Robert. *Earthquakes and engineers: an international history*. Reston, Va: American Society of Civil Engineers, 2011. ISBN 978-0-7844-1071-4.
- [17] Active Vibration Isolation System - Technical Notes. online. In: *DAEIL SYSTEMS*. Dostupné z: <https://www.daeilsys.com/support/technical-notes/active-vibration-isolation-system/>. [citováno 2023-10-29].
- [18] *KATEDRA MAKRO A MIKROEKONOMIKY*. Žilinská univerzita v Žilině <http://fria.fri.uniza.sk/~kmame/drupal/?q=system/files/Morfologick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf>, 2012-.
- [19] Vibration Data Collector Signal Analysis. online. In: *Crystal Instruments*. Dostupné z: <https://www.crystalinstruments.com/vibration-data-collector-signal-analysis>. [citováno 2023-11-19].
- [20] *Dielektrická pevnost izolantů - Škola Jinak*. 2024-02-19. Dostupné z: <https://skola.jinak.cz/lubos/elektrotech/dielektricka-pevnost-izolantu/>. [citováno 2024-05-13].
- [21] MIREK. *Elektrická pevnost — ElektriKa.cz, reportážní portál instalační elektrotechniky, vyhlášky, schémata zapojení*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://elektrika.cz/terminolog/eterminolog2definition.2006-04-22.5895106704>. [citováno 2024-05-13].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Metoda DRAWING [vlastní zpracování].....	14
Obrázek 2 Metoda FORCESPINNING [vlastní zpracování]	15
Obrázek 3 Metoda MELTBLOW [vlastní zpracování]	16
Obrázek 4 Metoda ELEKTROSPINNING [vlastní zpracování]	17
Obrázek 5 Druhy elektrod, A – Strunová elektroda, B – zvlákňování z elektrody speciálního tvaru, C – Koaxiální elektroda, D – zvlákňování z rotačního válce [vlastní zpracování].....	18
Obrázek 6 A) Tvorba TAYLOROVA kužele [vlastní zpracování], B) Detail Taylorova kužele [10].....	21
Obrázek 7 Harmonický pohyb [9]	22
Obrázek 8 Závislost amplitudy na součiniteli naladění [10].....	23
Obrázek 9 Transmisivita závislá na frekvenci [12]	25
Obrázek 10 Schéma pasivního tlumení vibrací [13].....	26
Obrázek 11 Příklady konstrukce silentbloků [16].....	27
Obrázek 12 Schéma aktivní izolace vibrací [17]	27
Obrázek 13 Rozdíl mezi pasivním a aktivním tlumením [17].....	29
Obrázek 14 Schéma funkce laboratorního přístroje [vlastní zpracování].....	31
Obrázek 15 Funkční model přístroje pro vizualizace povrchových vln v kapalinách [vlastní archiv autora].....	31
Obrázek 16 Funkční model ramena přístroje pro vizualizace povrchových vln v kapalinách [vlastní archiv autora]	32
Obrázek 17 Morfologická matice [vlastní zpracování].....	33
Obrázek 18 Navrhovaný koncept 1 [vlastní zpracování].....	34
Obrázek 19 Navrhovaný koncept 2 [vlastní zpracování].....	35
Obrázek 20 Navrhovaný koncept 3 [vlastní zpracování].....	36
Obrázek 21 Kinematické schéma přístroje [vlastní zpracování]	38
Obrázek 22 Měření zrychlení na ploše stolu [vlastní archiv autora]	41
Obrázek 23 Prostředí programu Engineering Data Managment [vlastní archiv autora]	41
Obrázek 24 Měření na stole se závažím [vlastní archiv autora]	43
Obrázek 25 Naměřené hodnoty na samotném stole [vlastní zpracování]	44

Obrázek 26 Naměřené hodnoty na podlaze laboratoře [vlastní zpracování]	45
Obrázek 27 Naměřené hodnoty na stole s těžkým závažím [vlastní zpracování].....	46
Obrázek 28 Graf výběru silentbloků [20]	47
Obrázek 29 Vybraný silentblok [21].....	48
Obrázek 30 Schéma navrhovaného zařízení [vlastní zpracování], 1,2 -vodící tyče, 3,4 -kuličková ložiska, 5,6 -závitové tyče	49
Obrázek 31 Výpočet průhybu nosníku [20].....	50
Obrázek 32 Volba koeficientů [20].....	51
Obrázek 33 Rám (3D vizualizace) [vlastní zpracování]	54
Obrázek 34 Laser sestava, řez a detail uchycení laserů [vlastní zpracování]	55
Obrázek 35 Zrcadla sestava a detail uchycení zrcadel [vlastní zpracování]	56
Obrázek 36 Elektroda sestava [vlastní zpracování]	57
Obrázek 37 Roztok sestava [vlastní zpracování]	58
Obrázek 38 Návrh laboratorního přístroje [vlastní zpracování]	59
Obrázek 39 Návrh bezpečnostního rámu [vlastní zpracování]	60
Obrázek 40 Konstrukce elektrody a podstavy [vlastní zpracování]	62
Obrázek 41 Nastavení simulace [vlastní zpracování]	63
Obrázek 42 Výsledek analýzy talířové el. pro $H=120\text{ mm}$ [vlastní zpracování].....	64
Obrázek 43 Výsledek analýzy hrotové el. pro $H=120\text{ mm}$ [vlastní zpracování].....	65
Obrázek 44 Graf závislosti hodnoty H na intenzitě el. pole [vlastní zpracování].....	66
Obrázek 45 Graf závislosti hodnoty H na intenzitě el. pole [vlastní zpracování].....	67
Obrázek 46 Hodnota intenzity na podstavě – TALÍŘOVÁ elektroda [vlastní zpracování]	68
Obrázek 47 Hodnota intenzity na podstavě – HROTOVÁ elektroda [vlastní zpracování]	68
Obrázek 48 Finální konstrukce laboratorního přístroje [archiv autora].....	69
Obrázek 49 Kontrolní měření laboratorního zařízení – schéma [vlastní zpracování]	70
Obrázek 50 Kontrolní měření laboratorního zařízení [archiv autora].....	70
Obrázek 51 Naměřené hodnoty na snímači 1 – stůl [vlastní zpracování].....	71
Obrázek 52 Naměřené hodnoty na snímači 2 - podstava [vlastní zpracování].....	71
Obrázek 53 Naměřené hodnoty na snímači 3 - konzola [vlastní zpracování]	72
Obrázek 54 Detail pozorovaného polymerního roztoku [archiv autora]	73
Obrázek 55 Laboratorní přístroj při měření [archiv autora]	73

Obrázek 56 Náznak chování povrchových vln [archiv autora].....	74
--	----

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Metoda pořadí – výběr vyhovujícího konceptu	37
---	----

SEZNAM PŘÍLOH

- 1) Výkresová dokumentace
- 2) Grafy prvotního měření vibrací
- 3) 2D grafy hodnoty intenzity elektrického pole – elektroda talířová
- 4) 2D grafy hodnoty intenzity elektrického pole – elektroda hrotová
- 5) Grafy ověřovacího měření vibrací

PŘÍLOHA 1

Výkresová dokumentace přiložena externě.

Díly:

S22000239-3

S22000239-4

S22000239-6

S22000239-12

S22000239-15

S22000239-20

S22000239-21

S22000239-23

Sestavy:

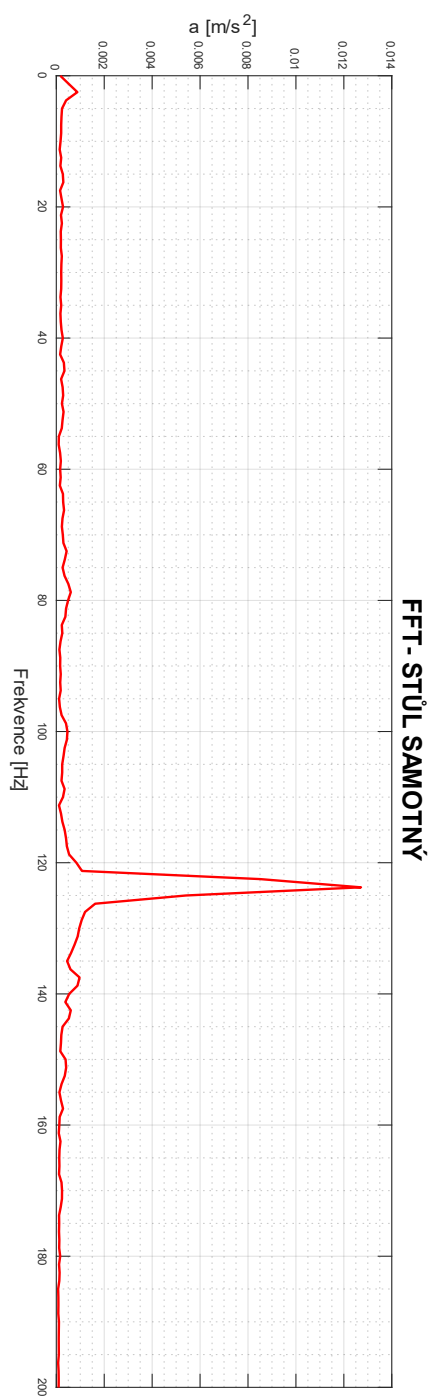
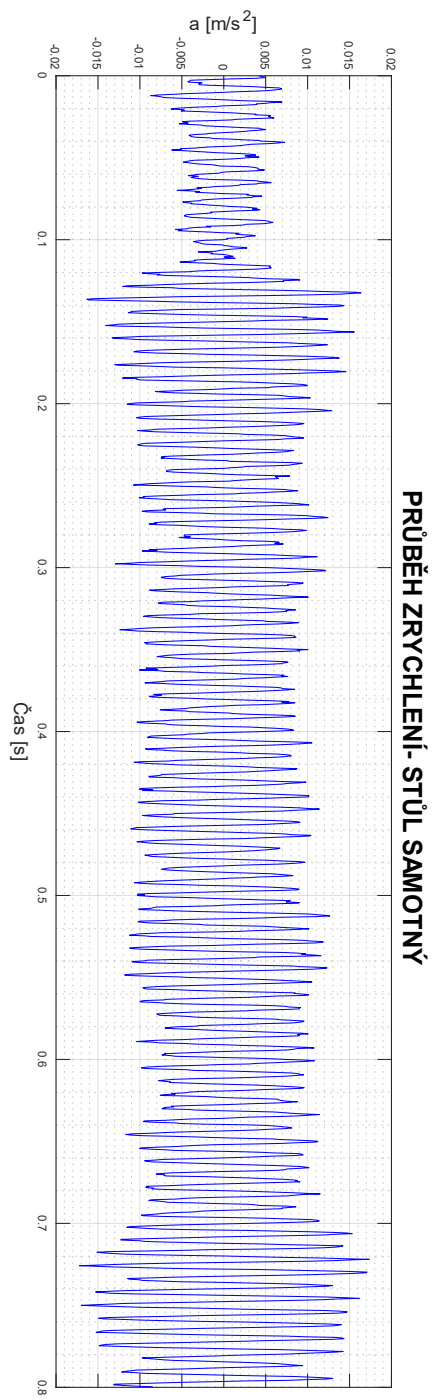
S22000239-S1

S22000239-S2

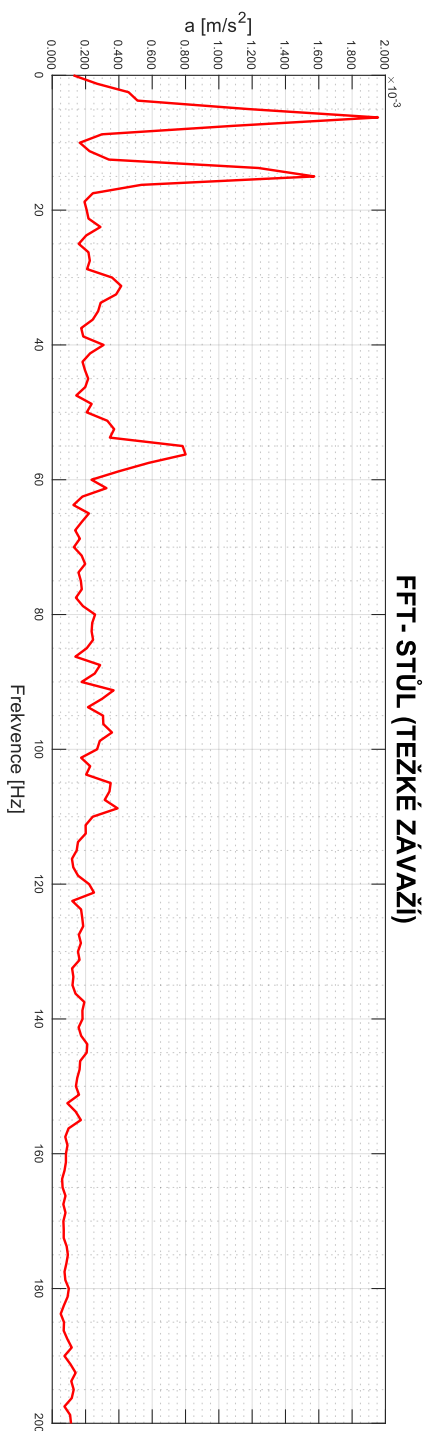
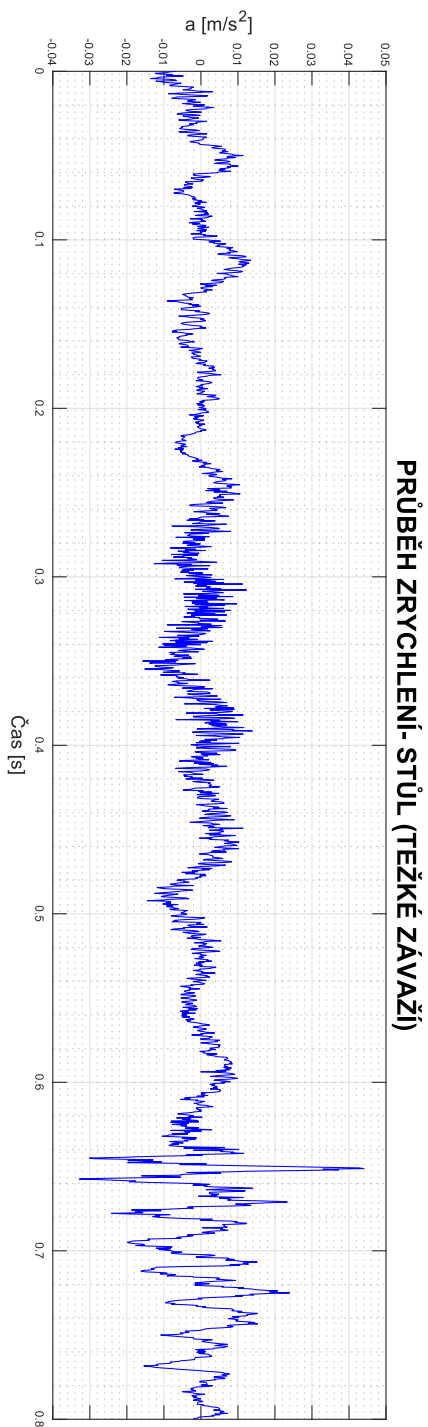
S22000239-S4

S22000239-S5

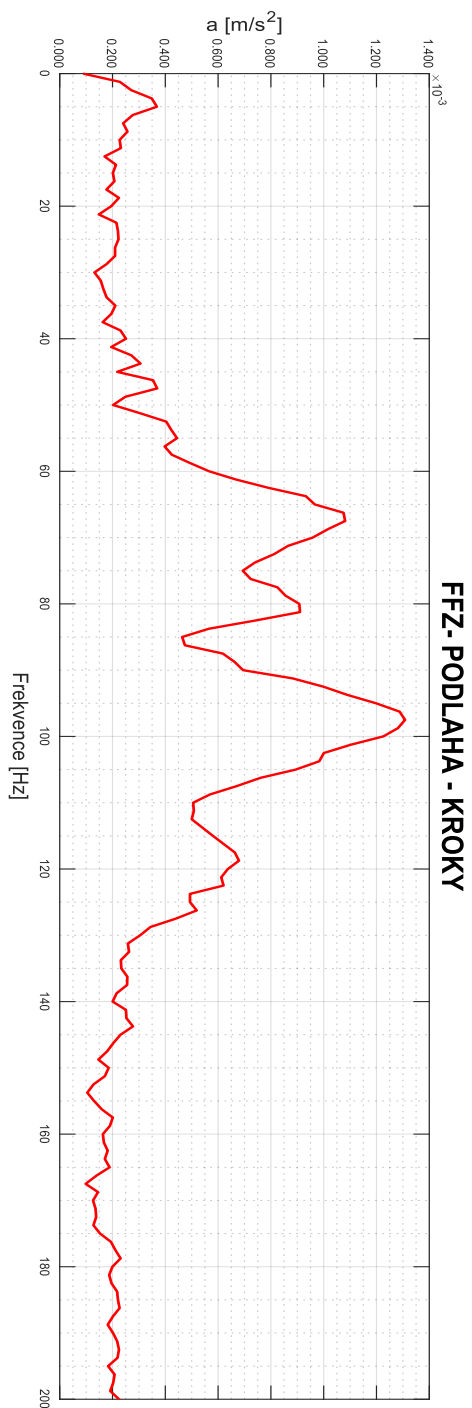
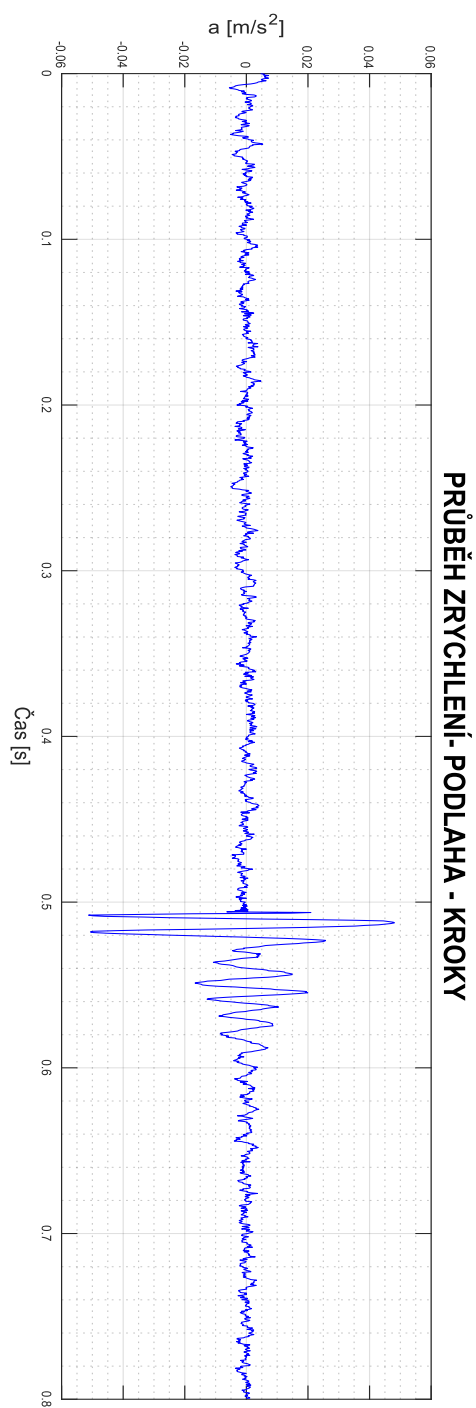
PŘÍLOHA 2.1



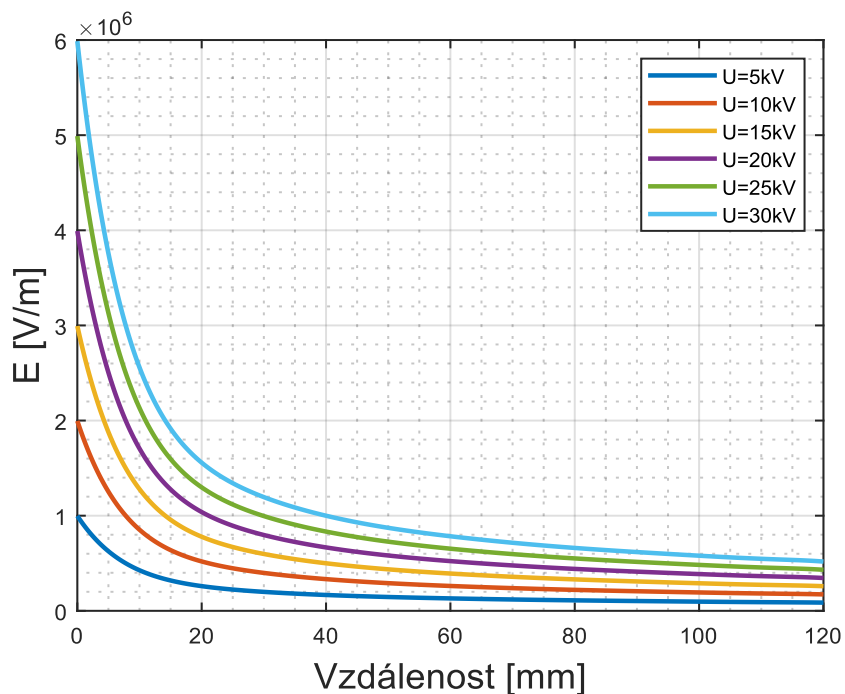
PŘÍLOHA 2.2



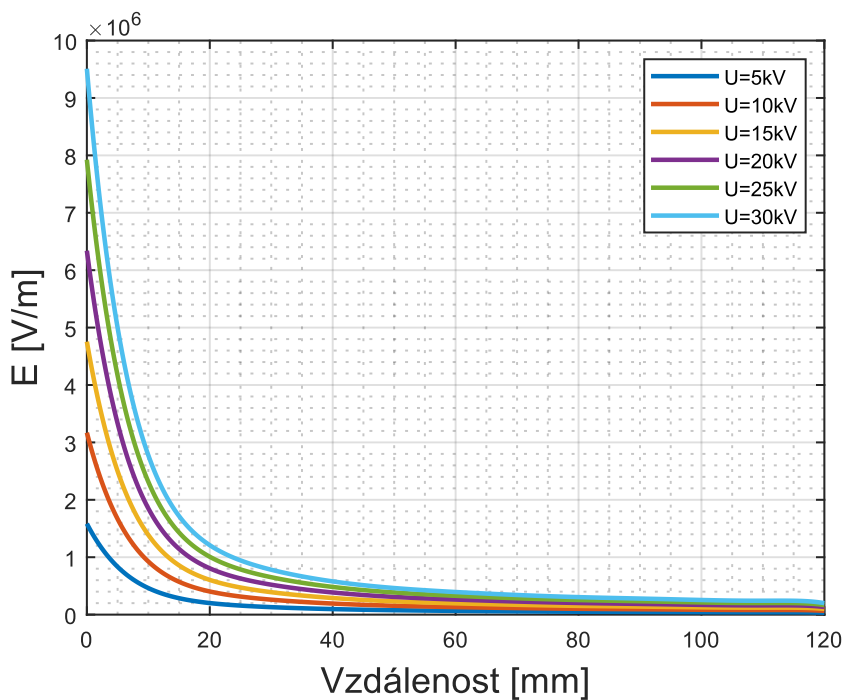
PŘÍLOHA 2.3



PŘÍLOHA 3 – HROTOVÁ ELEKTRODA



PŘÍLOHA 4 – TALÍŘOVÁ ELEKTRODA



PŘÍLOHA 5

