



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH A VÝROBA VIBRAČNÍHO STOLU S
BUZENÍM NEVÝVAHOU**

DESIGN AND FABRICATION OF A VIBRATION SHAKER WITH EXCITATION BY IMBALANCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominik Demura

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Rubeš, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Dominik Demura
Studijní program:	Mechatronika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Rubeš, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh a výroba vibračního stolu s buzením nevyváhou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na pracovišti zabývajícím se vibračními mikrosběrači je potřeba využívat různých zdrojů vibrací pro testování vyvinutých zařízení. Jedním z možných zdrojů vibrací je buzení nevyváhou a takový zdroj by měl být předmětem této práce.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše základních principů mechanických budičů vibrací
2. Návrh vibračního stolu pro frekvence v rozsahu 10 až 100 Hz
3. Návrh vlastního budiče s nevyváhou pro buzení frekvencí do 100 Hz a amplitudy zrychlení v rozsahu 0,1 g až 1g
4. Výroba vibračního stolu a budiče vibrací
5. Testování a validace vyrobeného zařízení s vibračním mikrosběračem

Seznam doporučené literatury:

KAŽMIERSKI, Tom J. a Steve BEEBY, ed. Energy Harvesting Systems [online]. New York, NY: Springer New York, 2011. ISBN 978-1-4419-7565-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4419-7566-9

KRATOCHVÍL, C. a J. SLAVÍK. Mechanika těles - Dynamika. Brno: Akademické Nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3446-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Témou tejto diplomovej práce je návrh a výroba vibračného stolu budeného nevyváhou. Hlavnou časťou práce je návrh konštrukcie stola. Návrh sa odvíja od základných požiadaviek ako je maximálna dĺžka nosníku, vlastná frekvencia a zmena vlastnej frekvencie. Zvyšná časť konštrukcie je prispôbena týmto požiadavkám a rozmerom nosníku. Ďalšia časť práce pozostáva z návrhu budiča, ten vychádza z požadovaných hodnôt zrýchlenia, frekvencii kmitania a hmotnosti budiča. V práci bol vykonaný mechanický návrh a následne riadenia budiča. Hlavnou časťou riadenia je Arduino, ktoré pomocou programu ovláda celý systém. V závere práce je celá experimentálna sústava vyrobená a otestovaná. Meranie je vykonané pomocou akcelerometru a vibračného mikrozberača.

ABSTRACT

The topic of this thesis is the design and production of a vibrating table excited by unbalance. The main part of the work is the design of the table structure. The proposal depends on the basic requirements such as the maximum length of the beam, the natural frequency and the change in the natural frequency. The rest of the structure is adapted to these requirements and the dimensions of the beam. The next part of the work consists of the design of the exciter, which is based on the required values of acceleration, frequency of oscillation and weight of the exciter. In the work, the mechanical design and subsequently the control of the exciter was carried out. The main part of the control is the Arduino, which controls the entire system with the help of a program. At the end of the work, the entire experimental system is manufactured and tested. The measurement is performed using an accelerometer and a vibration energy harvester.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

vibrácie, budiče vibrácií, mechanické budiče vibrácií, vibračný mikrozberač, akcelerometer, zrýchlenie, Arduino, 3D tlač, rýchla Fourierova transformácia

KEYWORDS

vibration, vibration exciters, mechanical vibration exciters, vibration energy harvester, accelerometer, acceleration, Arduino, 3D printing, fast Fourier transform

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

DEMURA, Dominik. *Návrh a výroba vibračního stolu s buzením nevývahou*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/145931>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ondřej Rubeš.

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu práce Ing. Ondřejovi Rubešovi, Ph.D., ktorý mi vždy vyšiel v ústrety a bol ochotný poradiť a odpovedať na moje otázky. Taktiež by som chcel poďakovať svojej priateľke, rodine a priateľom, ktorí ma vždy podporovali a boli mi pri vypracovaní práce nápomocní.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením vedúceho práce a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa

.....

Demura Dominik

OBSAH

1 ÚVOD	10
2 BUDIČE VIBRÁCIÍ	11
2.1 Elektrodynamické budiče vibrácií	13
2.2 Hydraulické budiče vibrácií	15
2.3 Pneumatické budiče vibrácií	17
2.4 Mechanické budiče vibrácií	20
3 MECHANICKÉ BUDIČE S ROTUJÚCOU NEVÝVAHOU	22
3.1 Elektrické vibračné motory	22
3.2 Matematický popis mechanického budiča s rotujúcou nevývahou	24
4 NÁVRH VIBRAČNÉHO STOLU	26
4.1 Obojstranne votknutý nosník	27
4.2 Výsledný návrh konštrukcie	31
4.3 Simulácia správania sústavy	32
5 NÁVRH VLASTNÉHO BUDIČA S NEVÝVAHOU PRE BUDENIE STOLU	35
5.1 Návrh mechanickej časti vibračného budiča	37
5.2 Návrh ovládacej časti vibračného budiča	42
6 VÝROBA ZARIADENIA	50
7 TESTOVANIE A VALIDÁCIA VYROBENÉHO ZARIADENIA	55
7.1 Meranie zariadenia s dĺžkou 1 m	56
7.2 Meranie zariadenia s dĺžkou 0,9 m	60
7.3 Meranie zariadenia s dĺžkou 0,6 m	63
7.4 Zhodnotenie merania	65
8 ZÁVER	67
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	69
ZOZNAM TABULIEK A OBRÁZKOV	71
Zoznam tabuliek	71
Zoznam obrázkov	71

1 ÚVOD

V dnešnej dobe sa s vibráciami stretávame takmer všade. V priemysle sú vibrácie často nechcené, pretože môžu viesť k poruchám alebo k úplnému zničeniu stroja. Sledovanie vibrácií a ich vplyvu na jednotlivé komponenty stroja ma veľký význam pre včasnú diagnostiku možných porúch. Naopak niekedy sú vibrácie potrebné k správne fungovaniu stroja, či zariadenia. Napríklad také reproduktory by bez vibrácií nemohli fungovať. Rovnako tak vibračné stoličky, ktoré sa používajú na zhutnenie betónu. V našom prípade je cieľom vibrácie vytvoriť a teda sú chcené a potrebné pre správne fungovanie sústavy.

Ako prvé je nutné si naštudovať teóriu o budičoch vibrácií. Práve tomu sa venuje rešerš práce. V kapitole sú popísané využívané fyzikálne princípy, využitie v praxi a pre každý typ budiča sú uvedené výhody a nevýhody. Nasleduje bližší popis mechanického budiča s nevyváhou, keďže práve tento typ budiča je použitý v práci.

Ďalšia kapitola je venovaná návrhu konštrukcie. Návrh konštrukcie sa odvíja od základných požiadaviek ako je maximálna dĺžka, vlastná frekvencia sústavy a jej zmena. Toto všetko je potrebné zväžiť pri návrhu konštrukcie. Ako prvé sú navrhnuté rozmery nosníku a spôsob uloženia. Následne je navrhnutá zvyšná konštrukciu zariadenia, tak aby boli splnené všetky požiadavky.

Nasleduje kapitola, ktorá sa venuje návrhu budiča vibrácií s nevyváhou. Ako prvé je potrebné navrhnuť mechanickú časť budiča, tak aby budič dosahoval požadované hodnoty zrýchlenia a frekvencie. Následne je navrhnutá ovládacia časť budiča. Hlavným prvkom ovládania je Arduino, ktoré pomocou programu riadi cele zariadenie. V tejto časti je taktiež uvedený popis fungovania programu.

Ako ďalšie je uvedený popis vyhotovenia konštrukcie zariadenia a taktiež budiča. V poslednom kroku konštrukcie ostáva navrhnuť a vyrobiť krabičku pomocou 3D tlače. Krabička obsahuje všetky ovládacie komponenty.

Na záver práce je realizované meranie pomocou akcelerometru a vibračného mikrozberaču. Meranie je vykonané pre tri rôzne dĺžky sústavy, s rovnakým nastavením nevyvah. Tým sa preukáže ako systém reaguje na zmenu dĺžky pri zachovaní veľkosti nevyvah. Pri každej dĺžke je zameraná voľná odozva systému na vybudenie. Z odozvy je určený pomerný útlm a faktor kvality. Následne sú zmerané amplitudo-frekvenčné charakteristiky zrýchlenia pre sústavu bez a s vibračným mikrozberačom. Týmto meraním sa preukázalo ako mikrozberač ovplyvní správanie systému. Na konci každého merania je mikrozberač pripojený k osciloskopu a je zmeraná hodnota generovaného napätia.

2 BUDIČE VIBRÁCIÍ

Informácie pre túto kapitolu sú z [1]. Štúdium a aplikácia budičov vibrácií má dlhú históriu. Používajú sa v rôznych oblastiach, ako je strojárstvo, veda o materiáloch, testovanie produktov a mnohých ďalších.

Vývoj budičov vibrácií bol motivovaný potrebou zabezpečiť spoľahlivé a efektívne prostriedky, ktoré budú slúžiť na zistenie mechanických vlastností materiálov. Použitie budičov vibrácií možno datovať do začiatku 20. storočia, kedy sa prvýkrát použili na hodnotenie pevnosti a odolnosti veľkých konštrukcií, ako sú mosty a budovy. V nasledujúcich desaťročiach sa vývoj budičov vyvíjal spolu s pokrokom v oblasti strojárstva a materiálovej vedy. Zavedenie elektronických komponentov a digitálnych riadiacich systémov v druhej polovici 20. storočia znamenalo významný míľnik vo vývoji vibračných budičov. To umožnilo väčšiu kontrolu nad frekvenciou, amplitúdou a tvarom vlny generovaných vibrácií, čo viedlo k presnejším a spoľahlivejším výsledkom testovania.

V súčasnosti sa budiče vibrácií používajú v rôznych aplikáciách. Najjednoduchšie budiče vibrácií dokážu generovať vibrácie v jednej ose, ale existujú špecializované systémy, ktoré kombinujú viacero budičov a vďaka tomu dokážu generovať vibrácie vo viacerých osách. Takéto systémy dokážu generovať vibrácie, ktoré sú veľmi podobné tým reálnym v praxi. Tieto najkomplikovanejšie budiče môžeme nájsť v leteckom priemysle a kozmickom výskume. Naopak jednoduchšie budiče sa využívajú na testovanie a posudzovanie elektroniky a vozidiel, s cieľom zistiť životnosť a spoľahlivosť komponent v rôznych podmienkach. Využitie taktiež nájdeme v stavebníctve kde sa používajú pri procesoch ako je oddeľovanie a triedenie sypkých materiálov, miešanie tekutín a hodnotenie stavieb z pohľadu seizmológie. Najjednoduchšie budiče nájdeme využitie v zábavnom priemysle na vytváranie realistických vibrácií a pohybov simulátorov v rôznych atrakciách.



Obr. 2.1. Typické použitie budičov vibrácií [2, 3 a 4]

Na obrázku 2.1. vľavo môžeme vidieť vibračnú platformu, ktorá dokáže simulovať jazdu automobilu po rôznych povrchoch a sledovať správanie a životnosť jednotlivých dielov automobilu. V strede obrázku môžeme vidieť vibračný stôl, ktorý sa v priemysle používa na zhutnenie betónu. Zhutnený betón je v stavebníctve často používaný. Ide o špeciálny typ betónu, ktorý je upravený vibráciami, tak aby dosahoval vyššiu pevnosť a trvácnosť. Napravo vidíme vibračné motory v hernom ovládači. Používajú sa ako hmatová spätná väzba hráčovi a tým robia hru viac realistickú.

Výber budiču vibrácii závisí od použitia a požadovaných vlastností. Najdôležitejšie parametre budičov sú sila, frekvenčný rozsah, maximálne zrýchlenie a maximálna výchylka.

Ďalej sa pozrieme na rozdelenie vibračných budičov podľa generovaného pohybu a fyzikálneho princípu na:

- Lineárne
 - Elektrodynamické
 - Hydraulické
 - Pneumatické

- Rotačné
 - Hydraulické
 - Pneumatické
 - Mechanické

- Kombinované
 - Mechanické

Každý z týchto typov budičov ma svoje výhody a nevýhody. Ďalej sa pozrieme na jednotlivé typy budičov. [5]

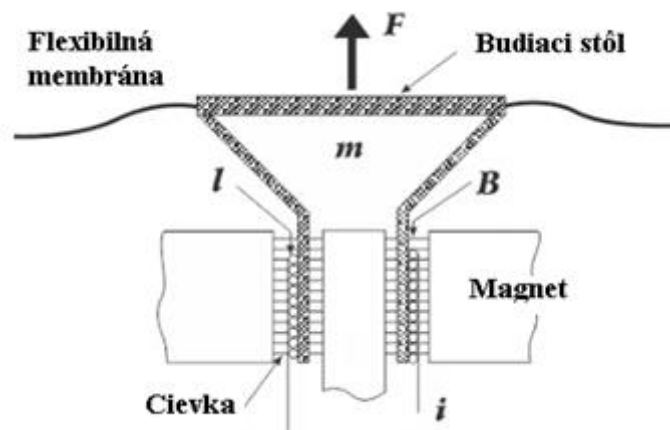
2.1 Elektrodynamické budiče vibrácií

Jedná sa o najbežnejšie lineárne typy budičov. Sú vysoko účinné a umožňujú presné riadenie frekvencie a amplitúdy vibrácií. Rozdielom oproti iným budičom je spôsob budenia, ktoré je prúdové. Elektrodynamické budiče využívajú podobného princípu ako reproduktory. Celá konštrukcia budiču je vyrobená tak, aby bola schopná znášať veľké mechanické namáhanie avšak nie je požadovaný tak široký rozsah frekvencií ako pri reproduktoroch (typicky do 10kHz). Konštrukcia elektrodynamického budiču je zobrazená na obrázku 2.2. Statorová časť budiču je tvorená permanentným magnetom, pohyblivá časť obsahuje cievku. Vzájomné pôsobenie cievky a magnetu, vytvára silu, ktorá budí mechanický systém. Navrchu pohyblivej časti budiču sa nachádza vibračná podložka, na ktorú sa upevňuje testovaný objekt. Vibračná podložka sa pohybuje iba v jednej ose, flexibilná membrána slúži k stabilizácii pohybu a plní úlohu tlmenia. [6 a 7]

Sila elektrodynamického budiču je daná vzťahom (2.1):

$$F = Bil \quad (2.1)$$

Kde F predstavuje silu [N], B je magnetická indukcia [T], I je prúd cievkou [A] a l je dĺžka magnetického obvodu [m].



Obr. 2.2. Konštrukcia elektrodynamického budiča [8]

Elektrodynamické vibračné budiče sú schopné generovať vysokofrekvenčné vibrácie a sú široko používané v rôznych aplikáciách, kde sa vyžadujú presné a kontrolované vibrácie. Svoje využitie nájdu v odvetviach ako: [6]

- Výskum a vývoj: používajú sa v testovacích a meracích aplikáciách, ako je testovanie odolnosti a únavy mechanických častí, meranie vibrácií konštrukcií a skúmanie vibrácií v biologických systémoch.
- Automobilový priemysel: používajú sa na testovanie rôznych komponentov, ako sú karoséria, sedačky, riadiace jednotky a pneumatiky. Cieľom testovania je overiť, či sú výrobky odolné voči vibráciám, ktoré môžu vzniknúť jazdou po nedokonalom povrchu vozovky.
- Letecký priemysel: používajú sa na testovanie a meranie vibrácií leteckých súčiastok a konštrukcií ako sú krídla, motory a podvozky. Tieto testy majú zaistiť, že letecké súčiastky budú odolné voči vibráciám a otrasom, ktoré môžu byť spôsobené letovou prevádzkou.

- Spotrebná elektronika: používajú sa pri testovaní spotrebnej elektroniky, ako sú smartfóny, tablety a notebooky. Tieto testy dokazujú, že zariadenia sú odolné voči vibráciám a otrasom, ktoré môžu byť spôsobené pádom zariadenia.

Na obrázku 2.3, môžeme vidieť testovanie odolnosti rakety voči vibráciám. K tomu sa používajú dva elektrodynamické budiče vibrácií.



Obr. 2.3. Využitie elektrodynamického budiča v praxi [9]

Elektrodynamické vibračné budiče majú niekoľko výhod oproti iným typom vibračných budičov, vrátane ich schopnosti generovať vysokofrekvenčné vibrácie, ich všestrannosti a jednoduchosti použitia. Generujú veľmi malý hluk, vďaka čomu sú ideálne pre aplikácie, kde je hluk problémom. Taktiež sú schopné poskytnúť presnú kontrolu nad frekvenciou, amplitúdou a priebehom generovaných vibrácií, vďaka čomu sú obľúbenou voľbou pre mnohé testovacie aplikácie. [10]

Naopak však môžu byť tiež relatívne drahé v porovnaní s inými typmi vibračných budičov a môžu tiež vyžadovať väčšiu údržbu. Taktiež nemusia byť vhodné na použitie v extrémnych teplotách, pretože sú citlivé na veľké zmeny teplôt. Výber elektrodynamického vibračného budiča závisí od špecifických požiadaviek testovacej aplikácie, vrátane frekvencie a amplitúdy vibrácií, veľkosti a hmotnosti testovaného objektu a požadovanej úrovne kontroly. [10]

2.2 Hydraulické budiče vibrácií

Ďalšie v poradí sú hydraulické budiče vibrácií. Tieto typy budičov transformujú stlačenú hydraulickú kvapalinu na mechanickú silu. Nastavením prietoku hydraulickej kvapaliny môžeme ľahko zmeniť výstup sily. Jedná sa o veľmi výkonné a všestranné zariadenia. Svoje využitie nájdu v širokom spektre náročných priemyselných aplikácií, ktoré vyžadujú silné a nastaviteľné vibrácie ako napríklad: [11a 12]

- Stavebný priemysel: používajú sa v stavebných zariadeniach, ako sú zhutňovače, baranidlá a rýpadlá, na generovanie vibrácií a nárazovej sily na zhutňovanie pôdy, zatĺkanie pilót a rozbíjanie betónu, taktiež testovanie seizmických efektov na stavby.
- Ťažobný priemysel: používajú sa v banských zariadeniach, ako sú vrtačky a drviče kameňov, aby poskytovali silné vibrácie a nárazovú silu na rozbíjanie hornín a minerálov.
- Potravinársky priemysel: používajú sa v zariadeniach na spracovanie potravín, ako sú sitá a separátory, na vytváranie jemných vibrácií na triedenie potravinárskych výrobkov.
- Námorný priemysel: používajú sa v námorných zariadeniach, ako sú námorné vibrátory a baranidlá, na vytváranie vibrácií a nárazovej sily pri stavbe a údržbách na mori.



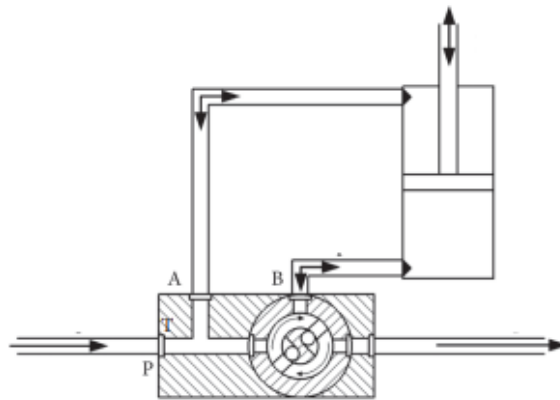
Obr. 2.4. Využitie hydraulického budiču v praxi [13]

Výhody týchto typov budičov sú že môžu generovať vysoký výkon vzhľadom na svoju veľkosť, vďaka čomu sú ideálne pre náročné aplikácie. Nepotrebujú náročnú údržbu a majú dlhšiu životnosť. Sú všestranné a nájdu využitie v širokom spektre aplikácií.

Majú však aj určité nevýhody, ako sú vysoké počiatkové náklady, úniky tekutín, obmedzený rozsah rýchlosti a environmentálne problémy. V neposlednej rade je to hluk, produkujú vysoký hluk a preto nie sú vhodné do prostredia, kde by hluk mohol byť nežiadúci. Celkovo sú hydraulické vibračné budiče užitočným a efektívnym nástrojom pre mnohé aplikácie, ktoré vyžadujú silné vibrácie. [12]

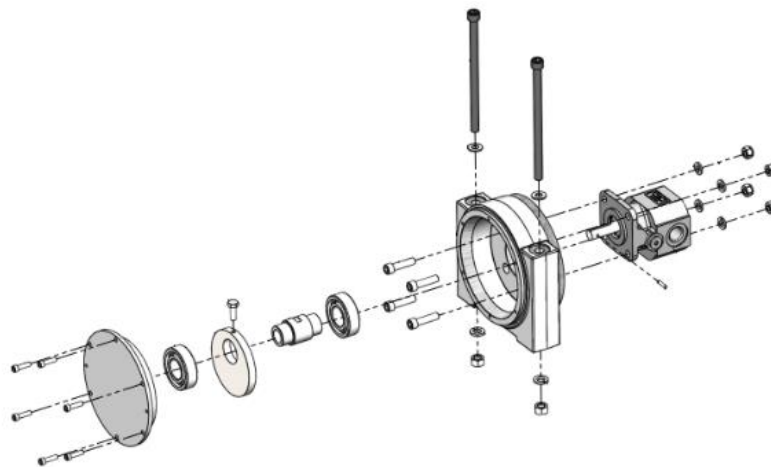
Ako už bolo na začiatku kapitoly spomenuté hydraulické budiče môžu mať dva typy vyhotovenia a to lineárne a rotačné.

- Lineárny hydraulický budič – generujú vibrácie pomocou hydraulického piestu, ktorý sa pohybuje lineárne. Ich výhodou je vysoká presnosť a opakovateľnosť vibrácií, čo z nich robí ideálnu voľbu pre aplikácie, ktoré vyžadujú presné a kontrolované vibrácie. Používajú sa v testovacích aplikáciách, pri kalibrácii senzorov alebo pri vývoji nových produktov. Ich funkcia je založená na tom, že hydraulický olej sa pumpuje do piestu, rýchlosť a veľkosť pohybu piestu býva nastavená pomocou riadiaceho ventilu. Na ventil je pripevnený elektromotor, ktorý ním otáča. Riadením otáčania ventilu dokážeme pomocou piestu vytvoriť vibrácie. Frekvenciu a intenzitu vibrácií je možné nastaviť ovládaním rýchlosti a tlaku hydraulickej kvapaliny. To umožňuje presné nastavenie hydraulického prúdu a tým aj presné nastavenie vibrácií. Konštrukciu lineárneho hydraulického budiču vibrácii môžeme vidieť na obrázku 2.5.



Obr. 2.5. Konštrukcia lineárneho hydraulického budiču [14]

- Rotačný hydraulický budič – generujú vibrácie pomocou rotačného hydraulického motoru. Ten pozostáva z hydraulického motoru a excentrického závažia alebo nevyváženej hmoty. Ich výhodou je, že dokážu generovať vysoký výkon, vysoké frekvencie a samozrejme aj ich životnosť. Vďaka ich sile a schopnosti pracovať pri vysokých frekvenciách sú obľúbenou voľbou pre aplikácie v odlievacom procese, pri triedení rôznych materiálov alebo pri testovaní súčiastok na únavu. Konštrukciu rotačného hydraulického budiču vibrácii môžeme vidieť na obrázku 2.6.



Obr. 2.6. Konštrukcia rotačného hydraulického budiču [13]

2.3 Pneumatické budiče vibrácií

Pneumatické budiče vibrácií sú zariadenia používané na generovanie vibrácií v mechanických systémoch pomocou stlačeného vzduchu. K svojej činnosti využívajú tlakovú energiu stlačeného vzduchu, ktorý pôsobí na pohyblivé časti, ktoré sú umiestnené v motore a sú zodpovedné za vznik vibrácií. Využívajú sa v aplikáciách, kde sa vyžaduje kompaktné riešenie, ktoré nebude nenáročné na údržbu a bude nízko nákladové. Využitie nájdú v rôznych priemysloch ako napríklad: [15 a 16]

- Automobilový priemysel: používajú sa v automobilovom priemysle na vibračné testovanie rôznych komponentov, vrátane motorov, zavesenia kolies a podvozkov.
- Baliaci priemysel: používajú sa v obalovom priemysle na dopravu a vibrovanie materiálov, ako napríklad vo vibračných podávačoch a násypkách.
- Priemysel manipulácie s materiálom: používajú sa v zariadeniach na manipuláciu s materiálom, ako sú dopravníkové systémy, na zabezpečenie vibrácií pre pohyb a oddeľovanie materiálov.
- Zlievarenský priemysel: používajú sa na zhutňovanie pieskových foriem a vytriasanie odliatkov.
- Textilný priemysel: používajú sa v textilnom priemysle na uvoľňovanie a oddeľovanie vlákien, ako aj v spriadacích a tkacích zariadeniach.
- Farmaceutický priemysel: používajú sa na uvoľnenie sypkých práškov a granúl z nádob
- Farbiarsky priemysel: používajú sa na miešanie farieb



Obr. 2.7. Využitie pneumatického budiču v praxi [17 a 18]

Jednou z výhod pneumatických vibromotorov je ich vysoký pomer výkonu a hmotnosti, ktorý im umožňuje vytvárať vysoké úrovne vibrácií pri relatívne nízkej hmotnosti. Majú tiež málo pohyblivých častí a vyžadujú malú údržbu, čo z nich robí spoľahlivú a cenovo výhodnú možnosť. Taktiež k svojmu ovládaniu nevyžadujú elektrickú energiu, čo z nich robí vhodnú možnosť pre použitie v nebezpečných prostrediach.[15]

Pneumatické vibromotory však môžu vytvárať značný hluk, čo môže byť v niektorých aplikáciách nevýhodou. Tiež nemusia poskytovať tak presné ovládanie frekvencie a amplitúdy vibrácií ako iné typy vibračných budičov. Zároveň vyžadujú stabilný prívod stlačeného vzduchu, čo môže byť problém v prostrediach, kde nie je stlačený vzduch ľahko dostupný. [15]

Pneumatické budiče vibrácií sa opäť delia na lineárne a rotačné, ďalej sa pozrieme na jednotlivé typy:

- Lineárny pneumtický budič – generuje lineárne vibrácie pomocou pneumtického pohonu. Skladá sa z pneumtického pohonu, valca, piestu a pružiny. Pneumatický pohon dodáva stlačený vzduch do valca, čím spôsobí, že sa piest pohne von z valca. Po uvoľnení tlaku, ktorý pôsobí na piest, pružina vráti piest do pôvodnej polohy. Tento proces sa rýchlo a pravidelne opakuje, čím vznikajú lineárne vibrácie. Ich výhodou je, že sú pomerne jednoduché na použitie, sú tiché a nemajú žiadne elektrické prvky, to z nich robí vhodný typ budiča aj do nebezpečného prostredia. Na druhej strane ich vibrácie sú zvyčajne menšie ako vibrácie generované elektrodynamickými alebo hydraulickými budičmi. Svoje využitie nájdu najmä pre vibračné dopravníky, vibračné stoly alebo miešacie zariadenia. Na obrázku 2.8, môžeme vidieť lineárny pneumtický budič. [16]



Obr. 2.8. Lineárny pneumtický budič [16]

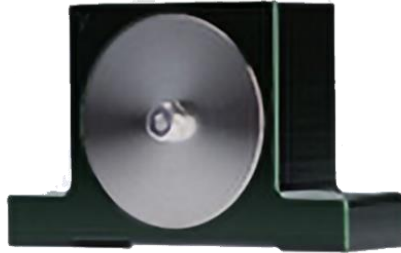
- Rotačné pneumtické budiče - generujú vibrácie pomocou rotačnej nevyváženej hmoty, ktorá je poháňaná stlačeným vzduchom. Ich výhodou je rovnako ako pri lineárnych nízka údržba a vhodné použitie aj v nebezpečných prostrediach. Naopak nevýhodou je, že nedokážu generovať také silné vibrácie ako predchádzajúce typy budičov. Svoje využitie nájdu najmä v vibračných dopravníkoch, vibračných triedičkách, balení produktov, odstraňovaní usadených materiálov alebo v betonárskom priemysle k zhutneniu betónu. Následne sa pozrieme na základné rozdelenie rotačných pneumtických budičov:

- a) Gulôčkový vibromotor – vyznačuje sa jednoduchou konštrukciou a dlhou životnosťou. Dokáže sa okamžite rozbehnúť a nevyžaduje žiadne mazanie. Jedinú pohyblivú časť tvorí oceľová guľička, ktorú vysokou rýchlosťou poháňa stlačený vzduch. Guľička spôsobuje vysokofrekvenčné vibrácie. Gulôčkové budiče sa väčšinou používajú na menšie aplikácie. Sila takéhoto budiču je obmedzená rozmermi a hmotnosťou guľičky a samotného budiču. Na obrázku 2.9. môžeme vidieť gulôčkový vibračný budič. [16]



Obr. 2.9. Gulôčkový vibromotor [16]

- b) Turbínový vibromotor – rovnako ako guľôčkový vibromotor aj turbínový sa vyznačuje jednoduchou konštrukciou a vysokou životnosťou. Pri turbínových vibromotoch poháňa stlačený vzduch turbínové kolo. Do tohoto kola sú vsadené nevyvážené hmoty. Tento typ vďaka špeciálnemu turbínovému profilu patrí medzi najtichšie pneumatické vibračné budiče. Nevyžaduje žiadne mazanie a je schopný dosahovať vyšších odstredivých síl ako guľôčkový vibromotor pri nižšej spotrebe vzduchu. Na obrázku 2.10, vidíme turbínový vibromotor. [16]



Obr. 2.10. Turbínový vibromotor [16]

2.4 Mechanické budiče vibrácií

Informácie pre túto kapitolu sú z [5 a 19]. Základné princípy mechanických vibračných budičov sú založené na generovaní periodických pohybov mechanickými prostriedkami, ako sú excentrické hmoty, rotujúce nevyvážené prvky a rôzne mechanizmy. Zvyčajne pozostávajú z elektrického motora alebo iného zdroja energie, ktorý poháňa práve excentrické závažie alebo časti mechanizmov. To spôsobuje, že sa otáčajú a vytvárajú vibrácie. Tie sa prenášajú na testovaný objekt. Frekvencie a amplitúdy vibrácií môžu byť riadené a upravené tak, aby vyhovovali špecifickým testovacím požiadavkám. Výkon budičov mechanických vibrácií je ovplyvnený faktormi, ako je konštrukcia budiča, veľkosť a prevádzkové podmienky, ako aj vlastnosti testovaného objektu. V praxi sa najčastejšie používajú na:

- Testovanie a meranie: používajú sa v testovacích a meracích aplikáciách, ako je testovanie odolnosti a únavy mechanických častí.
- Vývoj produktu: používajú sa pri vývoji nových produktov, aby sa otestovala ich odolnosť a zabezpečilo sa, že spĺňajú požadované špecifikácie.
- Modálna analýza: používajú sa v modálnej analýze na meranie prirodzených frekvencií a tvarov režimov štruktúr, ktoré môžu poskytnúť cenné informácie o ich dynamickom správaní a pomôcť identifikovať potenciálne problémy alebo konštrukčné vylepšenia.
- Stavebný a baliaci priemysel: používajú sa na dopravu a vibrovanie materiálov, ako napríklad vo vibračných podávačoch, násypkách, triedičoch, zhutňovačoch, dopravníkov a až po oddeľovanie pevných látok od kvapalín.



Obr. 2.11. Využitie mechanického budiču v praxi [20]

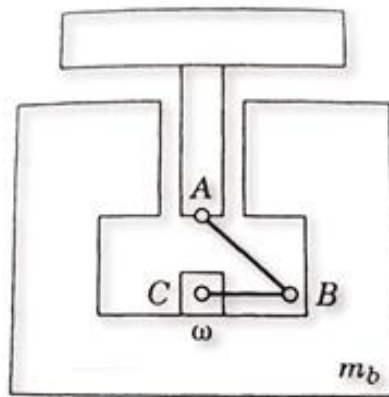
Jednou z výhod mechanických budičov je možnosť generovať vysoké úrovne vibrácií s relatívne nízkou spotrebou energie, čo z nich robí energeticky efektívnu možnosť pre mnohé priemyselné aplikácie. Majú jednoduchú konštrukciu, nemôže dôjsť k úniku kvapalín ako je tomu pri hydraulických budičoch. Často bývajú veľmi robustné a dokážu vydržať drsné podmienky prostredia, vďaka čomu sú vhodné na použitie v priemyselných alebo vonkajších aplikáciách. Taktiež môžu byť lacnejšie ako iné typy budičov, vďaka čomu sú dostupnejšie pre širší okruh používateľov a aplikácií.

Nevýhodou je, že môžu byť hlučné, čo môže byť v určitých prostrediach problém. Keďže využívajú elektrickú energiu nie sú vhodné do nebezpečných priestorov. Taktiež sa nemôžu použiť v prostredí, kde dochádza k veľkým zmenám teplôt. Môžu byť tiež relatívne ťažké a veľké, čo môže obmedziť ich vhodnosť pre určité aplikácie. Taktiež problém môže predstavovať ovládanie, najmä pokiaľ ide o nastavenie frekvencie alebo amplitúdy vibrácií. Často sú navrhnuté pre špecifické aplikácie, čo môže obmedziť ich možnosť prispôbenia na iné použitie. V neposlednom rade treba myslieť na to, že na zabezpečenie optimálneho výkonu vyžadujú určitú údržbu (najmä výmena ložísk).

Celkovo sú mechanické budiče obľúbenou voľbou pre mnohé priemyselné aplikácie vďaka ich vysokému výkonu, spoľahlivosti a všestrannosti. Ich hlučnosť a obmedzené možnosti ovládania však môžu byť v niektorých situáciách nevýhodou.

Mechanické budiče vibrácií sa delia na dve základné skupiny:

- a) **Kombinované mechanické budiče** – Inak nazývané aj budiče s priamym pohonom. Medzi tie patrí kľukový mechanizmus, kulisový mechanizmus a vačkový mechanizmus. Všetky tieto mechanizmy premieňajú rotačný pohyb na priamočiary. Kľukový mechanizmus neposkytuje dokonalé sínusové vibrácie, pokiaľ požadujeme presné sínusové vibrácie je najvhodnejšia voľba kulisový mechanizmus. Ten vďaka svojej konštrukcii dokáže generovať presné sínusové vibrácie, pohyb kulisy je rovnomernejší ako pri kľukovom mechanizme. Ďalšia výhoda kulisového mechanizmu je jednoducho nastaviteľná dĺžka zdvihu. Pokiaľ požadujeme vibrácie so špecifickým priebehom je najvhodnejšie použiť vačkový mechanizmus. Priebeh vibrácií závisí od tvaru vačky. Hlavná výhoda týchto mechanizmov spočíva v ich jednoduchosti, naopak ich neväčšia nevýhoda je, že nedokážu prenášať veľké sily. Pri prenose veľkých síl by vznikali veľké straty trením a s tým aj spojené opotrebovanie jednotlivých dielov. Na obrázku 2.12, môžeme vidieť kombinovaný mechanický budič vibrácií. [19]

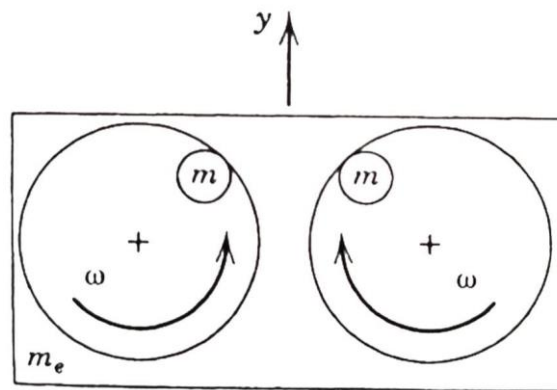


Obr. 2.12. Budič vibrácií s priamym pohonom [19]

- b) **Rotačné mechanické budiče s nevyváhou** – keďže tento typ budiču bude hlavným predmetom práce, na bližší popis sa pozrieme v nasledujúcej kapitole.

3 MECHANICKÉ BUDIČE S ROTUJÚCOU NEVÝVAHOU

Keďže jednou z hlavných úloh práce bude navrhnutie vlastného budiču vibrácii s rotujúcou nevyváhou, v tejto kapitole sa pozrieme bližšie na fungovanie takéhoto budiču. Tento typ využíva rotačný pohyb nevyváženej hmoty a premieňa ho na vibračný pohyb. Nevyvážená hmota predstavuje nerovnomerné rozloženie hmoty okolo osi rotácie. Nevyváženosť spôsobuje moment, ktorý prenáša kývavý pohyb na rotor a tým aj na celé zariadenie na ktorom sa nevyvážená hmota nachádza. V mnohých zariadeniach sa chceme nevyváženosti zbaviť, pretože vytvára nežiadúce vibrácie napr. nevyvážené kolesa na automobile spôsobujú vibrácie ktoré sú veľmi nepríjemné pre celú posádku automobilu. Naopak pri iných zariadeniach sa takéto vibrácie vyžadujú. Mechanizmus s nevyváženou hmotou je najvyužívanejším mechanickým budičom vibrácii. Na obrázku 3.1 vidíme dve nevyvážené hmoty, ktoré sa otáčajú v opačných smeroch. Tým je zabezpečené, že vznikne dynamická sila, ktorá pôsobí iba v jednom smere y . [19]



Obr. 3.1. Budič vibrácii s rotujúcou nevyváhou [19]

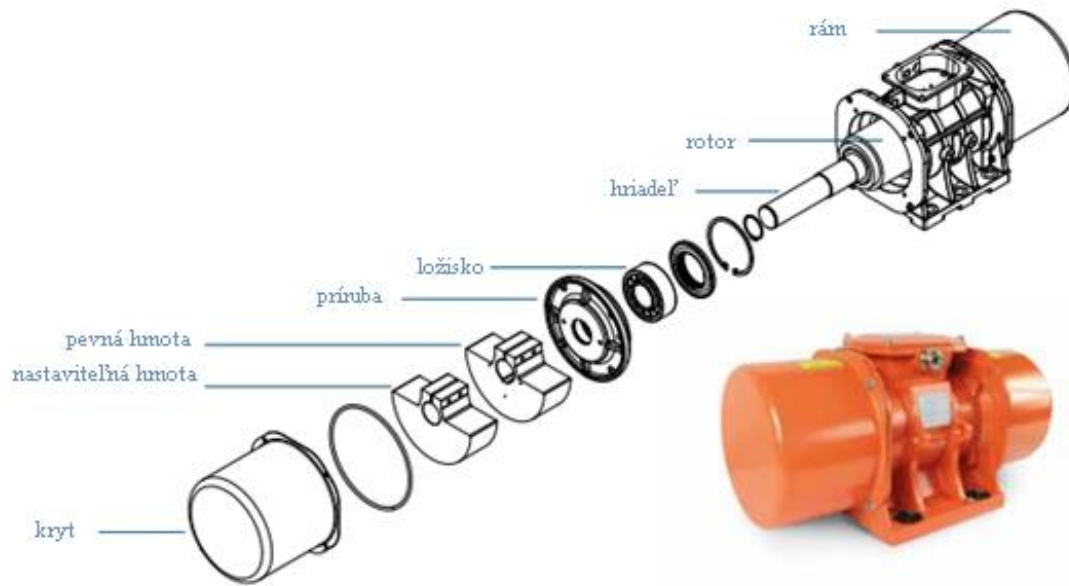
Medzi mechanické budiče s rotujúcou nevyváhou patria elektrické vibračné motory, ktoré sú v praxi najbežnejšie používané mechanické budiče.

3.1 Elektrické vibračné motory

Elektrické vibračné motory patria do skupiny mechanických budičov s rotujúcou nevyváhou. A práve konštrukcia elektrického vibračného budiču bude inšpiráciou pri návrhu vlastného budiča. V tejto kapitole si povieme niečo o konštrukcii elektrických vibračných budičov, o ich typickom použití, ale taktiež o ich výhodách a nevýhodách.

V praxi sa najčastejšie používajú budiče s nevyváhou vo forme kompaktných elektrických vibromotorov. Elektrické vibromotory sú zariadenia, ktoré prevádzajú elektrickú energiu na mechanickú energiu. Tieto zariadenia väčšinou obsahujú asynchrónny elektromotor, ktorý pohybuje nevyváženou hmotou (excentrom). Tento nevyvážený moment vytvára vibrácie, ktoré sa prenášajú na zariadenie, na ktorom je vibromotor namontovaný. Môžu byť rôznych veľkostí a výkonov, od malých vibračných zariadení až po veľké vibračné dosky používané v priemyselných aplikáciách. Na obrázku 3.2, môžeme vidieť konštrukciu elektrického vibračného motora, ktorý má kompletne uzatvorenú skriňu motora, ktorá je odolná voči vibráciám. Na konštrukcii sa nachádzajú široké pätky a odliate rebrá, ktoré dokážu zabezpečiť prenos veľkých odstredivých síl. Na oboch koncoch hriadeľa sú umiestnené odstredivé kotúče,

ktoré slúžia na vytváranie odstredivej sily. Motor je uzatvorený ochrannými krytmi a tesnením. Tým je zabezpečené, že sa do motora nedostane prach ani vlhkosť. [21]



Obr. 3.2. Konštrukcia vibračného motoru [22]

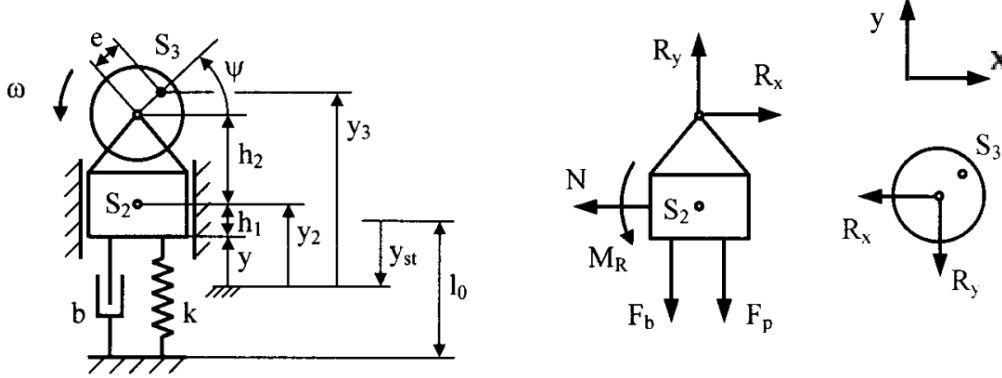
Ako už bolo spomenuté, odstredivé kotúče (nevývaha) sú najdôležitejšia časť vibračného motoru pretože generujú odstredivú silu. Typy nevývah a ich rozloženie má za následok vibračnú intenzitu. Odstredivá sila sa z pravidla dá nastaviť v rozmedzí 20% až 100%, čo je veľká výhoda pretože dokážeme použiť jeden vibračný motor pre viac aplikácií. Ďalšou výhodou vibračných motorov je vysoká efektívnosť pri prenose vibrácií na zariadenie, na ktorom sú namontované. [21]

Naopak nevýhody elektrických vibračných motorov spočívajú v tom, že na svoju prevádzku potrebujú elektrickú energiu. Nie sú také silné, ako iné zdroje vibrácií, napríklad hydraulické vibračné motory. Ďalšou nevýhodou môže byť obťažnosť riadenia takýchto motorov. Väčšina elektrických vibračných motorov využíva asynchrónny elektromotor. Tieto motory sú určené na prevádzku pri danom sieťovom kmitočte, najčastejšie 50 Hz poprípade 60 Hz. Motory pri ktorých je dovolená prevádzka na nižších kmitočtoch potrebujú na riadenie menič kmitočtu. Pri prevádzke s meničom kmitočtu musí byť menič vhodný na použitie v kombinácii s daným vibračným motorom. Musí byť zabezpečené, že vysoký nábehový prúd bude počas rozbehu plne k dispozícii. Pri prevádzke motorov s príliš nízkym kmitočtom hrozí, že motory nedosiahnu menovitý počet otáčok alebo sa nesynchronizujú. Odporúča sa motory neprevádzkovať pri kmitočte nižšom ako je 40% sieťového kmitočtu. [21]

To má za následok obmedzenie použitia elektrických vibračných motorov. Nie sú vhodné pre aplikácie, kde potrebujeme presne nastaviteľné vibrácie. Najviac sa využívajú v priemyselných aplikáciách, kde nám nezáleží na presných vibráciách, ale na ich funkčnosti. Najčastejšie sa s nimi môžeme stretnúť pri zhutňovaní betónu, preprave materiálov, triedení a separácii, miešaní a rozdeľovaní liekov, taktiež slúžia na rýchle uvoľňovanie súčiastok na montážnych linkách a mnoho ďalších použití.

3.2 Matematický popis mechanického budiča s rotujúcou nevyváhou

Keďže je budič s rotujúcou nevyváhou predmetom práce pozrieme sa na matematický popis správania systému, ktorý je budený rotujúcou nevyváhou. Takýto systém si môžeme predstaviť ako model s jedným stupňom voľnosti poháňaný nevyváhou. Na obrázku 3.3, môžeme vidieť analýzu systému zo silového hľadiska. Informácie pre matematický popis problému sú z [23].



Obr. 3.3. Silový rozbor systému s nevyváženou rotujúcou hmotou [23]

Uvažujme, že máme na pružne uloženom základe (v našom prípade na nosníku) o hmotnosti m_2 namontovaný nevyvážený kotúč o hmotnosti m_3 , ktorý sa otáča uhlovou rýchlosťou ω . Stred hmotnosti kotúča je excentricky posunutý voči osi rotácie o vzdialenosť e . Obe telesá sme si uvoľnili, výchylku základu (nosníku) budeme uvažovať od statickej rovnovážnej polohy y . Vplyv tiažovej sily je v našom prípade zanedbateľný. Pre riešenie pohybu si napíšeme pohybové rovnice základne a kotúča.

$$m_2 \ddot{y}_2 = -F_b - F_p + R_y, \quad m_3 \ddot{y}_3 = -R_y \quad (3.1)$$

Ďalej si vyjadríme súradnice stredy hmotnosti:

$$y_2 = y + h_1 \quad y_3 = y + h_1 + h_2 + e \sin \psi, \quad \text{kde } \psi = \omega t + \psi_0 \quad (3.2)$$

A vypočítame ich druhé derivácie podľa času:

$$\ddot{y}_2 = \ddot{y} \quad \ddot{y}_3 = \ddot{y} - e\dot{\psi}^2 \sin \psi, \quad (\ddot{\psi} = 0) \quad (3.3)$$

Následne môžeme z pravej rovnice (3.1) vyjadriť R_y a dosadiť do ľavej rovnice vrátane vyjadrenia síl v pružine a tlmiči. Potom dostávame tvar rovnice:

$$m_2 \ddot{y} = -b\dot{y} - ky - m_3 \ddot{y} + m_3 e \dot{\psi}^2 \sin \psi \quad (3.4)$$

Všetky členy s y prevedieme na jednu stranu a celú rovnicu podelíme $(m_2 + m_3)$, po tejto úprave dostávame tvar rovnice:

$$\ddot{y} + 2b_r \Omega \dot{y} + \Omega^2 y = r_e \omega^2 \sin(\omega t + \psi_0) \quad (3.5)$$

Kde:

$$2b_r \Omega = \frac{b}{m_2 + m_3}, \quad \Omega^2 = \frac{k}{m_2 + m_3}, \quad r_e = \frac{m_3 e}{m_2 + m_3} \quad (3.6)$$

Vo vzorci (3.5) môžeme vidieť nový parameter b_r pomerný útlm, na pravej strane môžeme vidieť výslednú silu, ktorou bude pôsobiť rotujúca nevyváha na konštrukciu:

$$F_n = r_e \omega^2 \sin(\omega t + \psi_0) \quad (3.7)$$

Novo zavedenú konštantu r_e nazývame redukovanou excentricitou kotúča. Pre výpočet amplitúdy výchylky použijeme nasledovný vzorec, kde Ω je vlastná frekvencia systému a ω je budiaca frekvencia:

$$r = \frac{r_e \omega^2}{\sqrt{(\Omega^2 - \omega^2)^2 + 4b_r^2 \Omega^2 \omega^2}}, \quad (3.8)$$

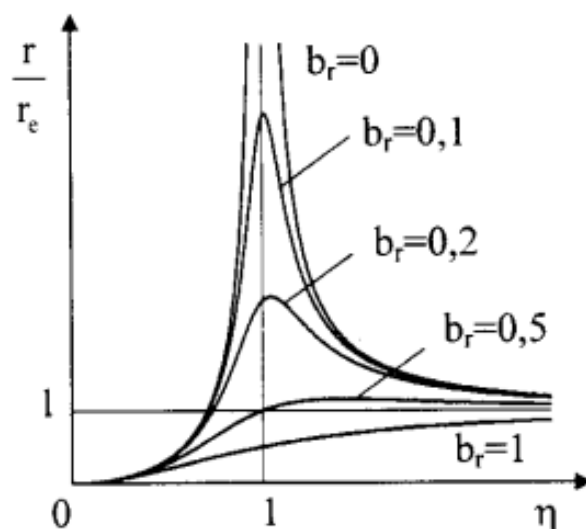
Pre vykreslenie amplitúdo-frekvenčnej charakteristiky ešte potrebujeme upraviť vzorec pre amplitúdu výchylky do bezrozmerného tvaru preto výraz $r_e \omega^2$ upravíme nasledovne:

$$r_e \omega^2 = \frac{r_e \omega^2 \Omega^2}{\Omega^2} = r_e \eta^2 \Omega^2 \quad (3.9)$$

Dostávame nový parameter η , činiteľ naladenia. Pretože $\eta = \frac{\omega}{\Omega}$ a po dosadení upraveného vzťahu do vzorca pre amplitúdu výchylky dostávame bezrozmerný tvar:

$$\frac{r}{r_e} = \frac{\eta^2}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4b_r^2 \eta^2}} \quad (3.10)$$

Tento tvar nám posluží pri kreslení amplitúdovej charakteristiky (obr. 3.4.). Vidíme, že pre nízke hodnoty budiacej frekvencie (činiteľ naladenia $\eta \approx 0$) bez ohľadu na tlmenie sústavy bude pomerná amplitúda prakticky nulová. Naopak, pre vysoké hodnoty budiacej frekvencie (činiteľ naladenia $\eta \approx \infty$) sa bude pomerná amplitúda blížiť 1. Amplitúda ustáleného vynúteného kmitania pre ($\eta \gg 1$) bude prakticky rovná redukovanej excentricite r_e .



Obr. 3.4. A-F charakteristika pre kmitanie spôsobené rotáciou nevývahy [23]

Pre ($\eta=1$) znamená, že sa systém nachádza v rezonancii a teda $\frac{\omega}{\Omega} = 1$. V tomto prípade by bola pomerná amplitúda netlmenej sústavy teoreticky nekonečná. Pre tlmenú sústavu v rezonancii má pomerná amplitúda konečnú hodnotu, ktorá je daná:

$$\frac{r}{r_e} = \frac{1}{2b_r} \quad (3.11)$$

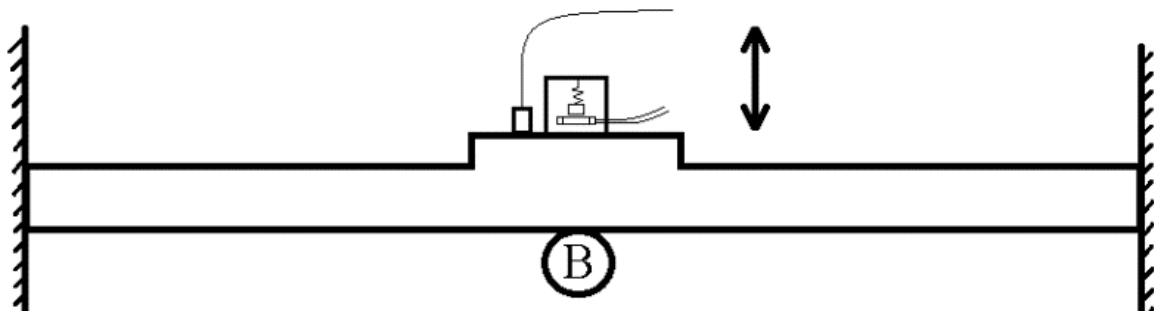
4 NÁVRH VIBRAČNÉHO STOLU

Hlavnou časťou tejto kapitoly je návrh vibračného stolu. Pôjde o nosník, ktorý je budený budičom vibrácii s nevývahou. Táto konštrukcia bude využívaná najmä ako zdroj vibrácii pre energy harvesting vibračné mikrozberače.

Najpodstatnejšou časťou sústavy je nosník, ktorý je zaťažený cyklickým namáhaním silou, ktorá bude generovaná vibračným budičom. Preto začneme návrhom parametrov nosníku a spôsobu jeho uloženia. Je požadované aby bola možnosť meniť dĺžku nosníka a tým zvyšovať tuhosť konštrukcie. Keď sa zvýši tuhosť konštrukcie, rastie vlastná frekvencia. Tým pádom sme schopní meniť vlastnú frekvenciu sústavy zmenou dĺžky nosníku.

Ako prvé je potrebné zvoliť, aký profil bude použitý. Rozhodli sme sa použiť profil obdĺžnikového prierezu. Takýto profil nám vyhovuje najviac, pretože vieme, že na nosník budeme pripevňovať ďalšie zariadenia ako napríklad vibračný budič alebo vibračný generátor. Rovnako ako vibračný budič aj vibračný generátor potrebuje rovnú dosádzaciu plochu. Právě preto je obdĺžnikový prierez vhodnejší ako kruhový. Ďalej treba určiť materiál, z ktorého bude nosník vyrobený. Zvolili sme oceľ 11 375, ide o neušľachtilú konštrukčnú oceľ, ktorá je vhodná na zváranie. Používa sa pre súčiastky konštrukcii stredných hrúbok, namáhaných staticky aj dynamicky. A teda je vhodná aj pre naše použitie.

Následne môžeme prejsť k spôsobu uchytenia nosníku. Rozhodli sme sa zvoliť obojstranne votknutý nosník, ktorý bude na stranách pevne ukotvený k nohám stolu. A tie sa následne prichytia k podstave. Na obrázku 4.1. môžeme vidieť, že v strede nosníku bude pôsobiť cyklické namáhanie, ktoré bude vytvorené vibračným budičom. Taktiež sa v strede bude nachádzať montážna podložka, ktorá bude slúžiť k namontovaniu testovaného objektu, v našom prípade vibračného mikrozberaču a akcelerometra.



Obr. 4.1. Nákres sústavy

Parametre z ktorých budeme pri návrhu konštrukcie vychádzať:

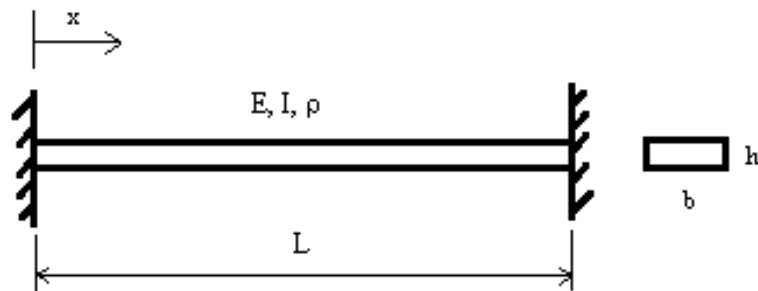
- Maximálna dĺžka nosníku 1 m
- Nastaviteľná vlastná frekvencia
- Potreba montážnej plochy, ktorá bude slúžiť na pripevnenie testovaného objektu
- Dostatočne pevné uchytenie nosníku

Je požadované aby sústava bola schopná kmitať 10 – 100 Hz, táto požiadavka bude splnená a neskôr popísaná v práci. Práve z tejto požiadavky budeme vychádzať pri návrhu vibračného budiča. Maximálna dĺžka nosníku je daná rozmerom podstavy na ktorú má byť sústava namontovaná. Ďalšou požiadavkou je aby bola možnosť meniť vlastnú frekvenciu sústavy. To dosiahneme tým, že budeme meniť jeho dĺžku. Samozrejme potrebujeme plochu, na ktorú bude umiestňovaný akcelerometer a vibračný mikrozberač, k tomu nám bude slúžiť montážna

podložka. Na záver sa musíme zamerať na dostatočne pevné uchytenie nosníku. Následne už môžeme prejsť k návrhu rozmerov nosníku, k tomu budeme potrebovať matematický popis správania nosníku. Na to sa pozrieme v ďalšej kapitole.

4.1 Obojstranne votknutý nosník

Ako bolo v úvode kapitoly spomenuté budeme uvažovať nosník konštantného obdĺžnikového prierezu, ktorý je v tomto prípade obojstranne votknutý (obr.4.2.). Informácie pre matematický popis problému sú z [24].



Obr. 4.2. Obojstranne votknutý nosník

Správanie obojstranne votknutého nosníku môžeme popísať pomocou pohybovej diferenciálnej rovnice:

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (4.1)$$

- Kde:
- E je modul pružnosti v ťahu [Pa]
 - I je kvadratický modul pružnosti [m⁴]
 - ρ je hustota [kgm⁻³].

Kvadratický modul pružnosti I môžeme vypočítať pomocou rozmerov nosníku ako:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad [\text{m}^4] \quad (4.2)$$

Následne predpokladáme riešenie v tvare separovaných premenných:

$$y(x, t) = Y(x)T(t) \quad (4.3)$$

Pomocou koreňov frekvenčnej rovnice sme schopní vypočítať vlastnú frekvenciu nosníku. Pre výpočet koreňov frekvenčnej rovnice potrebujeme iba priestorovo závislú zložku $Y(x)$, ktorá ma tvar:

$$\frac{d^4}{dx^4} Y(x) - c^2 \left(\frac{\rho}{EI} \right) Y(x) = 0 \quad (4.4)$$

Predpokladáme riešenie v tvare:

$$Y(x) = C_1 \sinh \beta x + C_2 \cosh \beta x + C_3 \sin \beta x + C_4 \cos \beta x \quad (4.5)$$

Vypočítame derivácie:

$$\frac{dY(x)}{dx} = C_1\beta \cosh \beta x + C_2\beta \sinh \beta x + C_3\beta \cos \beta x - C_4\beta \sin \beta x \quad (4.6)$$

$$\frac{d^2Y(x)}{dx^2} = C_1\beta^2 \sinh \beta x + C_2\beta^2 \cosh \beta x - C_3\beta^2 \sin \beta x - C_4\beta^2 \cos \beta x \quad (4.7)$$

$$\frac{d^3Y(x)}{dx^3} = C_1\beta^3 \cosh \beta x + C_2\beta^3 \sinh \beta x - C_3\beta^3 \cos \beta x + C_4\beta^3 \sin \beta x \quad (4.8)$$

$$\frac{d^4Y(x)}{dx^4} = C_1\beta^4 \sinh \beta x + C_2\beta^4 \cosh \beta x - C_3\beta^4 \sin \beta x + C_4\beta^4 \cos \beta x \quad (4.9)$$

Následne si musíme definovať okrajové podmienky výpočtu.

Okrajové podmienky:

$$\text{Votknutie (x = 0):} \quad Y(0) = 0 \text{ nulová výchylka} \quad (4.10)$$

$$\left. \frac{dY}{dx} \right|_{x=0} = 0 \text{ nulové natočenie} \quad (4.11)$$

$$\text{Votknutie (x = L):} \quad Y(L) = 0 \text{ nulová výchylka} \quad (4.12)$$

$$\left. \frac{dY}{dx} \right|_{x=L} = 0 \text{ nulové natočenie} \quad (4.13)$$

Po dosadení okrajovej podmienky (3.10) do rovnice (3.5) opäť dostávame vyjadrenie konštant:

$$C_2 + C_4 = 0 \rightarrow C_4 = -C_2 \quad (4.14)$$

Po dosadení okrajovej podmienky (3.11) do rovnice (3.6) opäť dostávame vyjadrenie konštant:

$$C_1 + C_3 = 0 \rightarrow C_3 = -C_1 \quad (4.15)$$

Po dosadení okrajovej podmienky (4.12) do rovnice (4.5) a úprave podľa (4.14) a (4.15) dostávame tvar rovnice:

$$C_1(\sinh \beta L - \sin \beta L) + C_2(\cosh \beta L - \cos \beta L) = 0 \quad (4.16)$$

Po dosadení okrajovej podmienky (4.13) do rovnice (4.6) a úprave podľa (4.14) a (4.15) dostávame tvar rovnice:

$$C_1(\cosh \beta L - \cos \beta L) + C_2(\sinh \beta L + \sin \beta L) = 0 \quad (4.17)$$

Následne môžeme rovnice (3.16) a (3.17) prepísať do maticového tvaru:

$$\begin{bmatrix} \sinh \beta L - \sin \beta L & \cosh \beta L - \cos \beta L \\ \cosh \beta L - \cos \beta L & \sinh \beta L + \sin \beta L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Pre získanie netriviálneho riešenia vypočítame determinant matice

$$\det \begin{bmatrix} \sinh \beta L - \sin \beta L & \cosh \beta L - \cos \beta L \\ \cosh \beta L - \cos \beta L & \sinh \beta L + \sin \beta L \end{bmatrix} = 0 \quad (4.19)$$

Tým že vypočítali determinant matice sa dostávame k netriviálnemu riešeniu v tvare:

$$(\sinh \beta L - \sin \beta L)(\sinh \beta L + \sin \beta L) - (\cosh \beta L - \cos \beta L)^2 = 0 \quad (4.20)$$

A po úprave dostávame konečný tvar:

$$\cos \beta L \cosh \beta L = 1 \quad (4.21)$$

Následne dostávame korene frekvenčnej rovnice.

Index	$\beta_n L$
n = 1	4,733
n = 2	7,855
n = 3	10,996

Tabuľka 1 – Korene frekvenčnej rovnice

Pre výpočet koreňov frekvenčnej rovnice pre $n \geq 3$ sa dá odvodiť vzorec:

$$\beta_n L = \left(\frac{1}{2} + n\right)\pi \quad (4.22)$$

Vlastnú frekvenciu potom vypočítame ako:

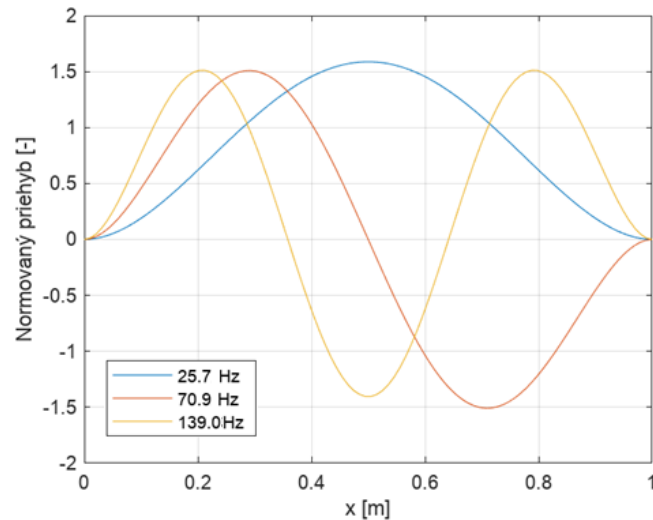
$$f_n = \frac{(\beta_n L)^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \quad [\text{Hz}] \quad (4.23)$$

Rozmer profilu [mm]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]	Hmotnosť [kg]
40x6	25,7	70,9	139,0	2,07
40x8	34,3	94,6	185,4	2,76
40x10	42,9	118,2	231,7	3,45
80x6	25,7	70,9	139,0	4,15
80x8	34,3	94,6	185,4	5,53
80x10	42,9	118,2	231,7	6,9

Tabuľka 2 – Vypočítaná vlastná frekvencia nosníku s dĺžkou 1m

V tabuľke 2 môžeme vidieť hodnoty vypočítaných vlastných frekvencií pre nami zvolené rozmery. Ako môžeme vidieť, vlastná frekvencia nezávisí na šírke nosníku ale na jeho hrúbke. Rovnako hrubé nosníky majú rovnakú vlastnú frekvenciu. Z tabuľky 2 sme vybrali širšie rozmery nosníka, pretože budú odolnejšie voči torznému kmitaniu. Bol zvolený rozmer 80x6. Keďže jeho prvá vlastná frekvencia je 25,7 Hz a vlastné frekvencie vibračných mikrozberačov, ktoré budeme sústavou budiť sú v okolí 20 Hz. Preto sa tento rozmer nosníku javí ako ideálny. Musíme počítať s tým, že hodnota vlastnej frekvencie sa pridaním konštrukčných prvkov a budiča na nosník ešte zníži.

Na obrázku 4.3. môžeme vidieť vlastné tvary a vlastné frekvencie pre nosník 80x6mm.



Obr. 4. 3. Vlastné tvary obojstranne votknutého nosníka

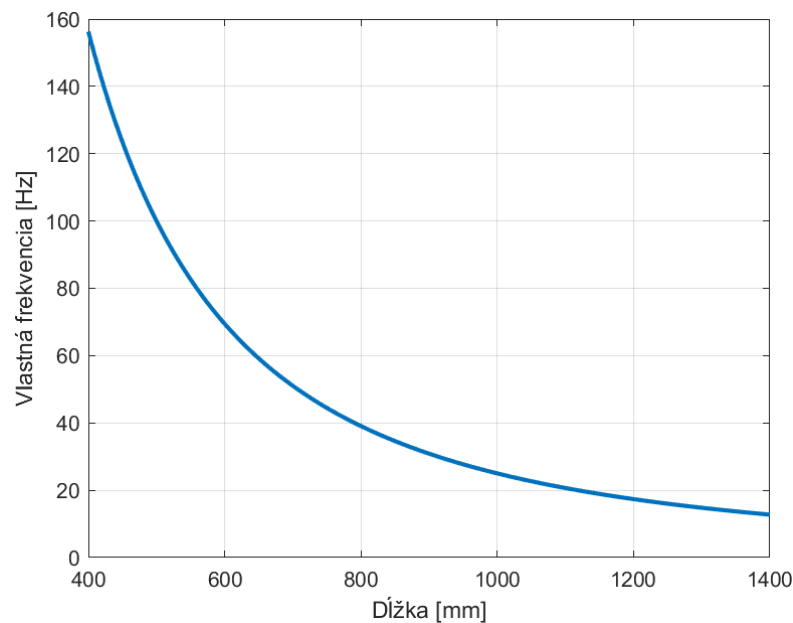
Ako už bolo spomenuté je požadované, aby sme boli schopní meniť vlastnú frekvenciu nosníka. To dosiahneme tým, že budeme meniť jeho dĺžku.

Pre vyjadrenie vlastnej frekvencie v závislosti na dĺžke použijeme vzorec (4.23). Pre dĺžku nosníka $L_1 = 1\text{ m}$ je vlastná frekvencia $\omega_1 = 25,7\text{ Hz}$ teraz budeme chcieť zmeniť vlastnú frekvenciu na $\omega_2 = 50\text{ Hz}$. Potom pre dĺžku platí:

$$L_2 = \sqrt{\frac{L_1^2 \omega_1}{\omega_2}} \quad [\text{m}] \quad (4.24)$$

$$L_2 = \sqrt{\frac{1^2 \cdot 25,7}{50}} = 0,717\text{ m} \quad (4.25)$$

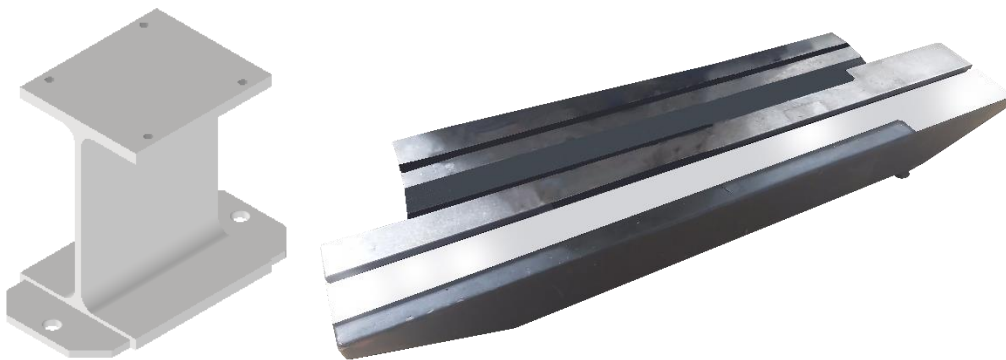
Na obrázku 4.4 môžeme vidieť graf závislosti vlastnej frekvencie na dĺžke nosníka . Ako bolo očakávané podľa vzťahu 4.23 s rastúcou dĺžkou nosníka sa vlastná frekvencia znižuje. Naopak s klesajúcou dĺžkou nosníka sa vlastná frekvencia zvyšuje.



Obr. 4. 4. Závislosť vlastnej frekvencie na dĺžke nosníka

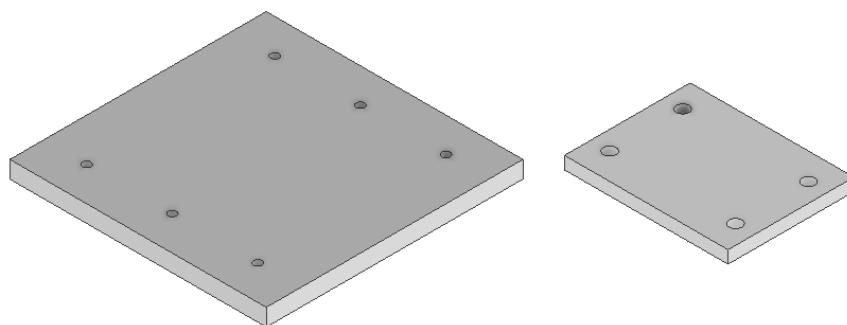
4.2 Výsledný návrh konštrukcie

V tejto kapitole sa pozrieme na návrh ďalších prvkov konštrukcie stola. Ako nosník budú použité dva IPE profily 220, každý na jednej strane nosníka. IPE profil predstavuje odľahčenú verziu I profilu. Rozmery profilu boli navrhnuté podľa rozmerov nosníka, tak by bolo možné nosník na profil položiť a následne pripevniť pomocou príložky a štyroch skrutiek. Preto boli do každého profilu vyvrtané štyri diery so závitom M8. Veľkosť dier pod závit sme volili podľa strojnícových tabuliek. Na IPE profil bude prizváraný úchyt (plochá tyč 100x6x38mm) s dierou. Táto časť bude slúžiť k pripevneniu IPE profilu na podstavu. Takéto natočenie IPE profilu bude odolnejšie voči vibráciám. Pripevnenie k podstave sa vykoná pomocou T matic, keďže podstava obsahuje T drážku. Podstava, ktorá bude použitá je dostupná v učebni. Na obrázku 4.5. môžeme vidieť spomínaný IPE profil a podstavu.



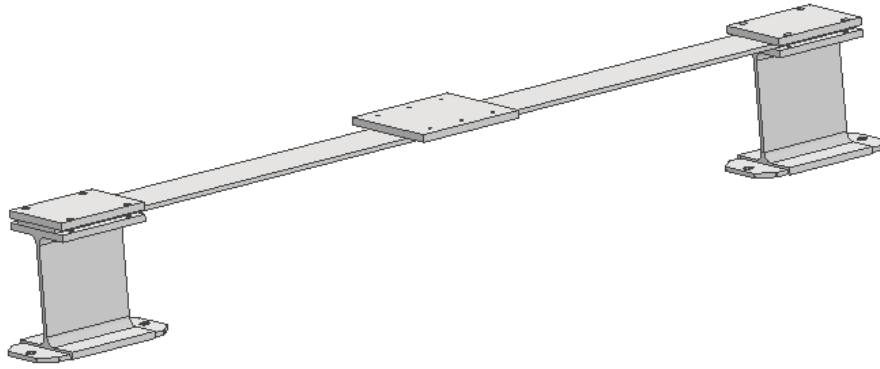
Obr. 4. 5. IPE profil 220 s úchytkami a podstava

Následne môžeme prejsť k montážnej podložke. Pôjde o plochú tyč s rozmermi 150x10x150mm. Montážna podložka bude pripevnená v strede nosníka. V podložke budú rovnomerne rozmiestnené diery so závitom M6, tak aby sa na podložku dalo jednoducho namontovať testovacie zariadenie. Ako posledné treba zvoliť spôsob uchytenia nosníka k IPE profilom. Rozhodli sme sa nosník pripevniť pomocou sťahovacích príložiek. Bude sa jednať o plochú tyč 130x10x110mm. Na každej nohe bude umiestnená jedna príložka, ktorá pomocou štyroch skrutiek M8 pripevní nosník k IPE profilom. Na obrázku 4.6. na ľavej strane môžeme vidieť montážnu podložku a na pravej strane sťahovaciu príložku.



Obr. 4. 6. Montážna doska a sťahovacia príložka

Po zmontovaní všetkých súčiastok dostávame výslednú sústavu (obr. 4.7.). Z predchádzajúcej kapitoly vieme, že samotný nosník má vlastnú frekvenciu 25,7 Hz. Ale samozrejme pridaním ďalších komponent na nosník má vplyv na vlastnú frekvenciu. Je jasné že vlastná frekvencia celej sústavy s vibračným budičom bude nižšia ako vlastná frekvencia samostatného nosníka. Na to sa pozrieme v nasledujúcej kapitole.



Obr. 4. 7. Výsledný návrh konštrukcie stola

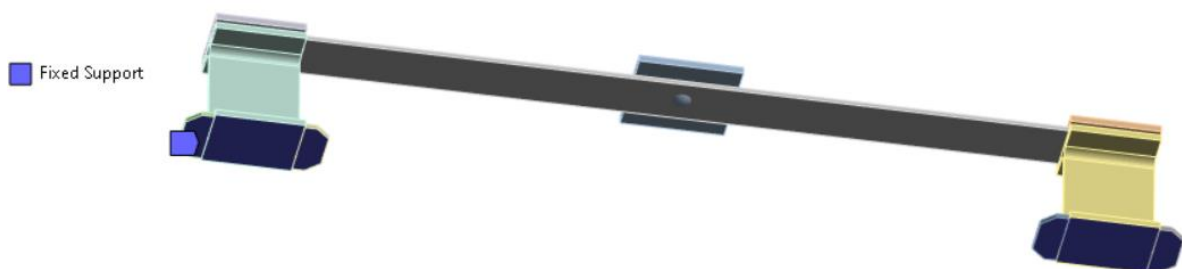
4.3 Simulácia správania sústavy

V prvom kroku je potrebné vymodelovať sústavu. K tomu bol využitý program Inventor. Následne si model prevedieme do programu Ansys. Dá sa očakávať, že pridaním montážnej dosky a vibračného budiča na nosník sa znížia hodnoty vlastných frekvencií. Aby sme si tento predpoklad potvrdili vykonáme modálnu analýzu.

Ako prvé sme z modelu odstránili všetky malé plochy, nezaťažené diery, skosenia a zaoblenia. To uľahčí tvorbu konečnej siete prvkov. Keďže vibračný budič bude mať nezanedbateľnú hmotnosť, preto sme do modelu pridali hmotnosť. K tomu bol použitý prvok „Point Mass“ ktorý bude simulovať prítomnosť budiča. Pridaná hmotnosť bude 1 kg. To znamená, že pri konštruovaní budiča budeme limitovaný jeho maximálnou hmotnosťou ktorá bude 1 kg. Umiestnenie tohto prvku bude v ťažisku nosníka, kde chceme aby bol budič situovaný.

Na spojenie prvkov, ktoré budú k sebe prizvárané použijeme väzby „bonded“. Táto väzba predpokladá, že povrchy sú úplne spojené a nevykazujú žiadne preklzavanie, odľahčovanie alebo pohyb. Používa sa na povrchy, ktoré sú napríklad lepené, zvárané alebo nitované. V našom prípade sa bude jednať o montážnu dosku a nosník, IPE profil a úchytku. Na spojenie komponent, ktoré sú spolu spojené skrutkovým spojom použijeme väzbu „No Separation“ táto väzba sa používa na komponenty spojené skrutkovým spojom. Zabezpečuje pevné spojenie medzi telesami, tak aby sa spojené súčiastky nepohybovali alebo aby neboli oddelené. Túto väzbu použijeme medzi nosníkom, príložkou a IPE profilom.

Okrajové podmienky riešenia boli zadané pomocou väzby „Fixed Support“. Táto väzba bude aplikovaná na spodok IPE profilu a na úchytky, pomocou ktorých bude celá sústava pripevnená k podstave ako môžeme vidieť na obrázku 4.8. Táto väzba neumožňuje žiaden pohyb a simuluje pevné spojenie medzi sústavou a podložkou.



Obr. 4. 8. Nastavenie okrajovej podmienky

Následne sme prešli ku konečnej sieti prvkov. Ako prvé sme využili automatické generovanie siete. Program vytvorí automaticky sieť, ktorá je rýchla a jednoduchá na generovanie. Ale samozrejme na to aby sme dosiahli požadovanú presnosť potrebuje dodatočné úpravy. Veľkosť takto vytvorenej siete bola 7404 uzlov a 922 prvkov. Vykonáme výpočet modálnej analýzy, s tým, že vieme, že dosiahnuté výsledky ešte nebudú presné. Ale získame hodnoty vlastných frekvencií, z ktorých budeme následne vychádzať. Ďalej je potrebné vykonať konvergenciu siete. Jedná sa o postup, ktorý iteratívne upravuje sieť s cieľom dosiahnuť požadovanú presnosť výsledku. Tento proces upravuje veľkosť prvkov siete v kritických oblastiach modelu, tak aby sieť presnejšie reprezentovala správanie systému. K tomuto procesu využijeme príkaz „Convergence“. Tento príkaz vykonáva zmeny v sieti a po každej zmene vykoná výpočet a vyhodnotí zmenu výsledkov. Na začiatku celého procesu zadáme povolenú zmenu výsledkov, to znamená ak sa budú výsledky líšiť o viac ako je nami nastavená hodnota, výpočet sa bude stále opakovať. Až kým nedosiahneme menšiu zmenu ako sme na začiatku procesu nastavili. Tým pádom sme dosiahli konvergenciu siete a samozrejme aj výsledkov. Nami nastavená maximálna povolená zmena bola 3%. Po niekoľkých iteráciách sme sa dopracovali ku konvergencii s dosiahnutou zmenou 2,71%. Keď sme ešte skúšali dosiahnuť menšiu zmenu narážali sme na limitáciu študentskej licencie. Program vytvoril príliš hustú sieť a študentská licencia už nepovoľovala vykonať výpočet. Na záver sme si skontrolovali „Element Quality“ táto funkcia slúži na určenie kvality prvkov siete. Jej veľkosť sa pohybuje od 0 po 1. Hodnota 0 znamená, že prvky sú veľmi nekvalitné a výsledky sú v podstate bezcenné. Naopak 1 určuje veľmi kvalitnú sieť s ktorou sme schopní dosiahnuť presné výsledky. Naš faktor kvality bol v rozsahu od 0,7 do 1. Hodnoty 1 dosahovali najviac zaťažené a teda najpodstatnejšie prvky konštrukcie. Hodnoty 0,7 boli dosahované na rádiuoch veľmi málo zaťažených podpor. Na obrázku 4.9 môžeme vidieť dosiahnutú konečnú sieť prvkov ktorá obsahuje 66606 uzlov a 44301 prvkov.



Obr. 4. 9. Sieť konečných prvkov

Dosiahnuté výsledky modálnej analýzy môžeme vidieť v tabuľke 3. V našom pracovnom rozsahu sa vyskytovali tri vlastné frekvencie.

Tvar	Vlastná frekvencia [Hz]
1	17,69
2	48,09
3	69,42

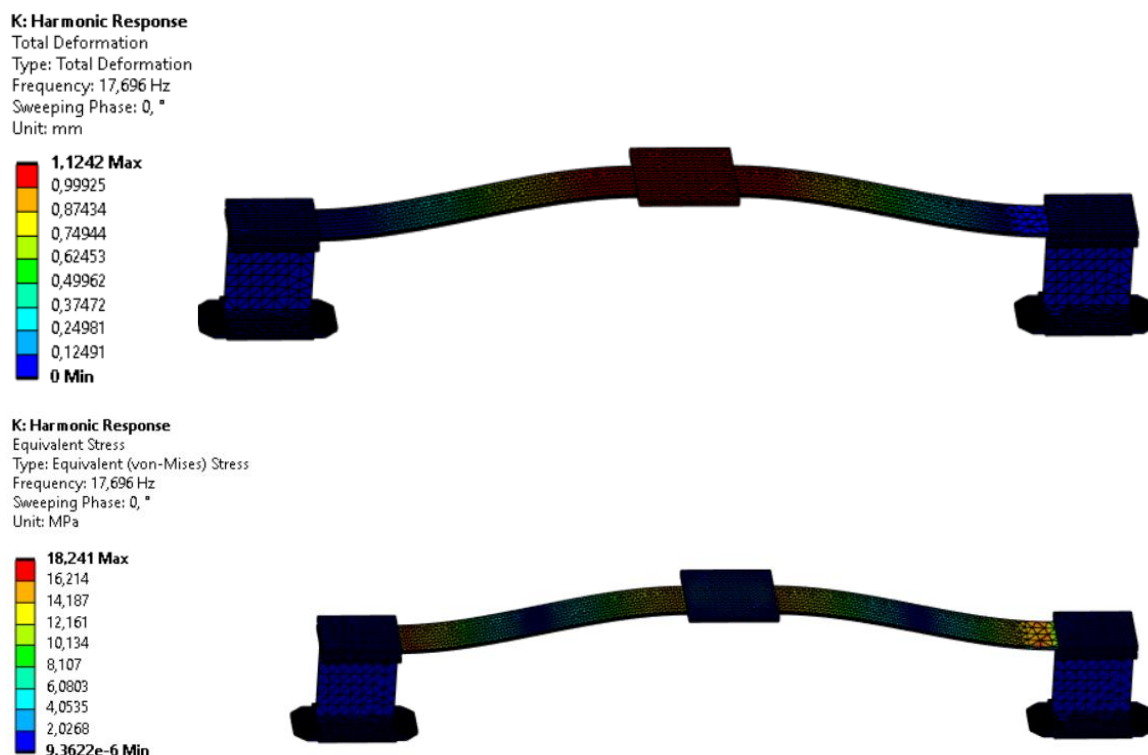
Tabuľka 3 – Výsledky modálnej analýzy

Z výsledkov vidíme, že pridanie hmotnosti na nosník malo za následok výrazne zníženie vlastných frekvencií.

Ďalej sa pozrieme na harmonickú analýzu. Tá sa využíva na simuláciu toho, ako bude sústava reagovať na sínusovo sa opakujúce dynamické zaťaženie. Pri tejto analýze môžeme použiť už nastavené kontakty medzi telesami, pridanú hmotnosť a okrajové podmienky, ktoré boli nastavené v modálnej analýze. Taktiež použijeme rovnakú sieť konečných prvkov ako vyšla

v modálnej analýze konvergenciou. Jediné, čo je potrebné je pridať silu. Rozhodli sme sa na sústavu aplikovať silu o veľkosti 20N. Táto sila bude simulovať silu, ktorou bude na sústavu pôsobiť budič. Bude teda umiestnená v ťažisku nosníka. Pred samotným výpočtom sme ešte vykonali citlivosťnú analýzu. Cieľom citlivostnej analýzy je dosiahnuť kompromis medzi časom potrebným na výpočet a presnosťou výpočtu. Tým, že znížime počet prvkov siete skrátime aj čas potrebný na výpočet. Preto sme postupne znižovali počet prvkov siete, toto znižovanie malo za následok veľké odchýlky vo výsledkoch. Naopak zvyšovanie počtu prvkov siete malo za následok iba nepatrné zmeny vo výsledkoch. Záver z našej citlivostnej analýzy je, že konvergencia siete nastavila dostatočne kvalitnú sieť konečných prvkov s ktorou sme schopní za rozumný čas výpočtu dosiahnuť pomerne presné výsledky.

Následne si ukážeme výsledky. Keďže nás zaujímala amplitúda výchylky a amplitúda napätia skúmali sme pôsobenie sily v okolí vlastnej frekvencie. Dosiahnuté výsledky môžeme vidieť na obrázku 4.10.



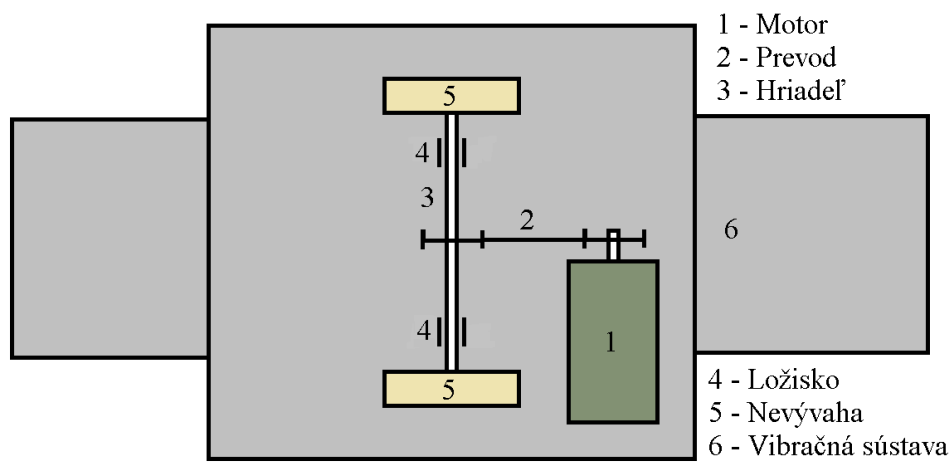
Obr. 4. 10. Dosiahnuté výsledky harmonickou analýzou

Z výsledkov vidíme, že maximálna deformácia bude uprostred nosníka a bude dosahovať veľkosť 1,12 mm. Naopak maximálne napätie bude v blízkosti uchytenia nosníku k podporám a bude dosahovať veľkosť 18,24 MPa.

Následne potrebujeme navrhnuť budič vibrácií, ktorý sa pripevní k sústave a bude generovať vibrácie. Na začiatku kapitoly sme si stanovili maximálnu hmotnosť budiča 1 kg, s touto pridanou hmotnosťou sme realizovali všetky numerické výpočty. Preto to bude podstatný parameter pri navrhovaní budiča. Na návrh vibračného budiča sa pozrieme v ďalšej kapitole.

5 NÁVRH VLASTNÉHO BUDIČA S NEVÝVAHOU PRE BUDENIE STOLU

V tento moment už máme navrhnutú konštrukciu stolu. Ďalej sa presunieme na návrh budiča vibrácii pre budenie. Budič je zodpovedný za generovanie riadených vibrácií. V rešerši boli spomenuté rôzne druhy budičov vibrácií. A bližšie bol popísaný mechanický budič vibrácií s nevyváhou. Pri návrhu budeme vychádzať z konštrukcie elektrického vibračného motoru. Použijeme DC motor, ktorý bude cez prevod poháňať hriadeľ, ktorá bude mať na oboch koncoch nevyváhu. Rotácia týchto nevyváh bude vytvárať vibrácie, ktoré sa budú prenášať na vibračnú sústavu na ktorej bude budič namontovaný. Na obrázku 5.1, môžeme vidieť schematický návrh konštrukcie vibračného budiča.



Obr. 5.1. Návrh konštrukcie budiča

Pri návrhu budiča je dôležité zobrať v úvahu rôzne faktory ako je frekvenčný rozsah, amplitúda vibrácií a typ vibrácií, ktoré chceme generovať. Taktiež musíme brať v úvahu hmotnosť budiča. Pretože hmotnosť môže ovplyvniť správanie celého zariadenia. Okrem požiadaviek ktoré sú uvedené v zadaní pribudla ešte požiadavka na maximálnu hmotnosť budiča. Keďže sme numerický výpočet vykonali s pridanou hmotnosťou 1 kg, práve toto bude náš limitujúci parameter pri návrhu.

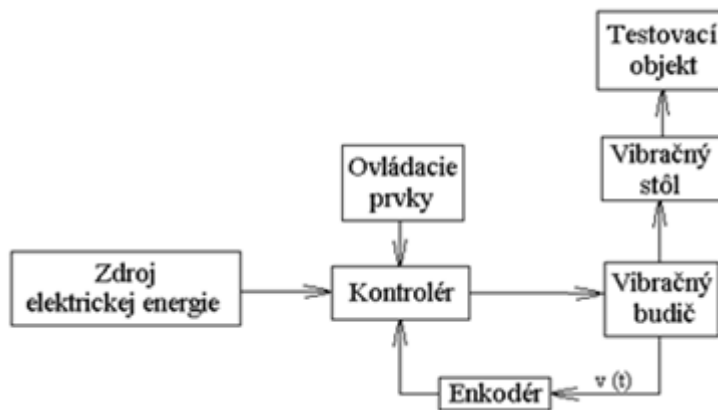
Požadované parametre, ktoré chceme dosiahnuť môžeme vidieť v tabuľke 4.

Typ vibrácií	Sínusové
Frekvencia kmitania	10 Hz až 100 Hz
Zrýchlenie	0,1 g až 1 g
Hmotnosť	< 1 kg

Tabuľka 4 - Požadované parametre

Samozrejme potrebujeme presne nastaviteľné vibrácie, a preto sa neskôr musíme zamerať na návrh ovládania budiča. Na obrázku 5.2, môžeme vidieť blokovú schému navrhovaného zariadenia. Pre ovládanie sa vo všeobecnosti používajú rôzne ovládacie prvky ako tlačidlá, potenciometre alebo rôzne dotykové obrazovky. Kontrolér slúži k riadeniu, vypočítavaniu a nastavovaniu požadovaných parametrov pre vibračný budič. Rovnako ako kontrolér aj vibračný budič potrebujú pre svoje fungovanie zdroj elektrickej energie. V riadiacej časti môžeme taktiež vidieť enkodér. Ten slúži na meranie a zaznamenávanie pohybu vibračného budiča. Vibračný budič produkuje pohyb, ktorý sa prenáša na objekt na ktorom je budič

pripevnený, v našom prípade vibračný stôl. Na vibračný stôl môže byť umiestnený akcelerometer alebo vibračný mikrozberač ako testovací objekt.



Obr. 5.2. Bloková schéma sústavy

Na bližší popis návrhu, či už mechanickej časti budiču alebo tej ovládacej sa pozrieme v nasledujúcich kapitolách.

5.1 Návrh mechanickej časti vibračného budiča

Je požadované aby sme boli schopní dosiahnuť frekvenciu kmitania 100Hz. Z toho dokážeme vypočítať potrebné otáčky motora pomocou vzťahu:

$$n_{mot} = f \cdot t = 100 \cdot 60 = 6000 \text{ ot/min} \quad (5.1)$$

Z výpočtu je jasné, že potrebujeme motor, ktorý bude schopný dosiahnuť aspoň 6000 ot/min. Kvôli presnému riadeniu je požadované aby motor obsahoval enkodér. Z ponuky motorov s enkodérom sme sa rozhodli použiť DC motor 775. Tento motor spĺňa požadované otáčky, obsahuje enkodér a poskytuje dostatočný výkon pre budenie stola. Parametre tohto motoru môžeme vidieť v tabuľke 5.

Výkon	100 W
Napätie	24 V
Otáčky naprázdno	8200 ot/min
Prúd naprázdno	0,55 A
Menovité otáčky	7200 ot/min
Menovitý prúd	3,2 A
Menovitý krútiaci moment	115 N·mm

Tabuľka 5 – Parametre motoru [25]

V tabuľke 5 vidíme, že motor má menovité otáčky 7200 ot/min. My požadujeme 6000 ot/min. Na základe toho vidíme, že bude potrebný prevod. Prevodový pomer dokážeme spočítať na základe požadovaných otáčok a menovitých otáčok motora nasledovne:

$$i = \frac{n_{mot}}{n_{poz}} = \frac{7200}{6000} = 1,2 \quad (5.2)$$

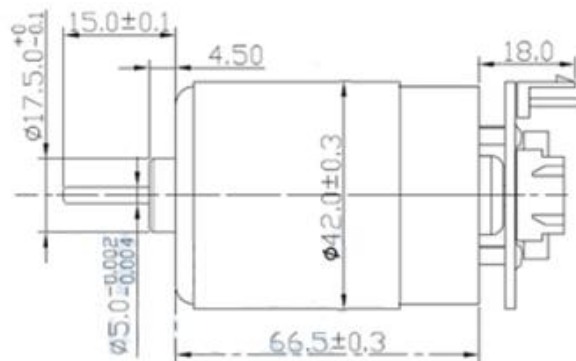
V tento moment musíme rozhodnúť aký prevod použijeme. Rozhodli sme sa použiť remeňový prevod. Remeňové prevody majú schopnosť tlmiť vibrácie, čím sa znižuje hlučnosť prevodu a zlepšuje sa stabilita a presnosť prevodu. Taktiež sú oproti iným typom prevodov ľahšie. Čo nám znižuje celkovú hmotnosť budiča. Pri výbere remenic a remeňu budeme vychádzať z požadovaného prevodového pomeru.

Tým, že chceme dosiahnuť čo najnižšiu hmotnosť budiča sme sa rozhodli použiť najmenšiu remenicu z ponuky firmy Mateza. [26] Jedná sa o ozubenú remenicu 21 T5/10, ktorá je vyrobená z hliníkovej zliatiny. Remenica má 10 zubov a je určená pre šírku remeňa 10mm. Táto remenica bude nalisovaná na hriadeľ motora. Následne sme schopný pomocou prevodového pomeru vypočítať druhú remenicu, ktorá bude na hriadeľ budiča.

$$i = \frac{z_2}{z_1} \rightarrow z_2 = i \cdot z_1 = 1,2 \cdot 10 = 12 \text{ zubov} \quad (5.3)$$

Výpočtom sme zistili, že druhá remenica musí mať 12 zubov. V ponuke sa nachádza remenica 21 T5/12. Práve táto remenica spĺňa naše požiadavky. Ako posledné musíme zvoliť dĺžku remeňa. Keďže chceme aby budič bol kompaktný a čo najviac v ťažisku stola. Rozhodli sme sa z ponuky zvoliť najkratší ozubený remeň 10 T5 200. Jedná sa o polyuretánový remeň s dĺžkou 200 mm. Ako ťažný element využíva oceľové vlákno. Je kompatibilný so zvolenými remenicami.

Na základe rozmerov motoru budeme navrhovať uchytenie motoru na konštrukciu stola. Rozmery motoru môžeme vidieť na obrázku 5.3.



Obr. 5.3. Rozmery motoru [25]

Na uchytenie použijeme tzv. motorovú objímku. Motorová objímka slúži na upevnenie motoru na konštrukciu stola. Jedná sa o kruh, ktorý obopína vonkajšiu plášť motoru. Motor sa v objímke upevní pomocou skrutky, ktorá stiahne objímku tak aby v nej motor pevne držal. Zároveň bude objímka slúžiť na šponovanie remeňu. Preto v základni budú vysústružené dve drážky pomocou ktorých sa bude dať motorom na konštrukcii pohybovať a tým šponovať remeň. Na obrázku 5.4. môžeme vidieť vyrobenú objímku.



Obr. 5.4. Motorová objímka

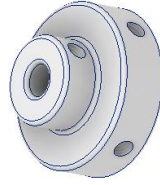
Následne sa presunieme k návrhu nevyvah. Ako už bolo spomenuté nevyvaha je kľúčovým prvkom vibračného budiča. Budič bude využívať dve nevyvahy, každá bude na jednej strane hriadeľa. Rotácia nevyvah bude vytvárať vibrácie. Vieme, že je požadované aby sústava bola schopná dosiahnuť zrýchlenia od 0,1g až 1g. Na základe toho sme si spočítali silu, ktorou musí nevyvaha na sústavu pôsobiť pomocou vzorca:

$$F_{max} = m \cdot a = 6,5 \cdot 9,81 = 63,8 \text{ N} \quad (5.4)$$

$$F_{min} = m \cdot a = 6,5 \cdot 0,981 = 6,38 \text{ N} \quad (5.5)$$

- kde m je celková hmotnosť vibrujúcej sústavy a a je požadované zrýchlenie.

Keďže je žiadané aby sme dokázali pomocou zmeny veľkosti nevyvah meniť parametre vibrácií. Rozhodli sme sa nevyváhu konštruovať ako rotujúci disk, ktorý bude mať po obvode 4 diery so závitom. Výhodou štyroch dier je možnosť nastavenia nevyvahy veľmi presne. Do dier so závitom bude možnosť našraubovať skrutky alebo nastavovacie skrutky. Tým dokážeme meniť veľkosť nevyvahy. Nevyvahu môžeme vidieť na obrázku 5.5. Nevyvaha bude na hriadeľi upevnená pomocou nastavovacej skrutky.



Obr. 5.5. Nevývaha

Veľkosť nevyváhy ovplyvňuje veľkosť sily, ktorá bude na sústavu pôsobiť. Silu ktorou bude nevyváha pôsobiť na sústavu môžeme vypočítať pomocou vzorca :

$$F_n = em\omega^2 = em(2\pi f)^2 \quad (5.6)$$

Kde e predstavuje excentrické posunutie stredu hmotnosti voči osi rotácie, m je hmotnosť nevyváhy. Taktiež musíme vo výpočte zohľadniť dve nevyváhy, každá na jednej strane hriadeľa. Máme mnohé možnosti nastavenia nevyváh, my si spočítame silu pre maximálnu a minimálnu nevyváhu.

Maximálne nastavenie nevyváh predstavuje použitie dvoch skrutiek, ktoré spolu vážia 15g a excentrické posunutie stredu hmotnosti je 5,9 mm, táto hodnota bola zistená pomocou programu Inventor, ktorý dokáže určiť stred hmotnosti pomerne presne. Maximálna sila bude pri maximálnej frekvencii sústavy a teda 100Hz, naopak najmenšia sila bude pôsobiť pri najnižšej frekvencii a teda 10Hz. Následne dokážeme vypočítať maximálnu silu, ktorá bude pôsobiť na sústavu:

$$F_{n100Hz} = 2em(2\pi f)^2 = 2 \cdot 5,9 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 100)^2 = 69,9 \text{ N} \quad (5.7)$$

$$F_{n10Hz} = 2em(2\pi f)^2 = 2 \cdot 5,9 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 10)^2 = 6,99 \text{ N} \quad (5.8)$$

Z výpočtov vidíme, že s maximálnym nastavením nevyváh sme schopní dosiahnuť väčšie zrýchlenia ako je požadované. Preto bude dôležité pred meraním správne nastaviť nevyváhy tak aby bolo dosiahnuté požadované zrýchlenie sústavy. Zmenou hmotností a excentricity nevyváh dokážeme meniť silu, ktorá pôsobí na sústavu, a tým pádom aj dosahované zrýchlenie.

Ďalej musíme zvoliť vodiaci prvok pre hriadeľ. Z ponuky sme sa rozhodli použiť upínacie stojaté ložisko KP08. Tento typ ložiskovej jednotky je najmenší z ponuky mnohých predajcov. Ak by sme chceli použiť menší priemer hriadeľa museli by sme nakupovať predražené špeciálne typy. Práve preto sme sa rozhodli použiť priemer hriadele 8mm. Tieto ložiskové jednotky sú bežne používané v rôznych aplikáciách napríklad v priemyselných strojoch, dopravníkových systémoch, robotických zariadeniach, CNC strojoch a mnohých ďalších. Jedná sa o kovový obal, v ktorom je umiestnené guľôčkové ložisko z chrómovej ocele. Vonkajší priemer jednotky je 63mm. Vnútorý priemer ložiska je 8mm. A teda je vhodný na použitie s naším hriadeľom. Maximálne zaťaženie ložiska je 15 kN. Na obrázku 5.6 môžeme vidieť ložiskovú jednotku KP08.



Obr. 5.6. Ložisková jednotka KP08 [26]

V tento moment už vieme akou maximálnou silou budú nevývahy pôsobiť. A zároveň sme si určili rozmer hriadeľa 8mm, keďže najmenšie bežne vyrábané ložiskové jednotky sú pre tento rozmer hriadeľa. Následne je potrebné overiť, či prevádzka s maximálnym nastavením nevývah a zvoleným hriadeľom bude bezpečná. Keďže na hriadeľ bude pôsobiť cyklické zaťaženie na ohyb a krut je dôležité ho skontrolovať na bezpečnosť voči pevnosti ale taktiež na bezpečnosť voči únavovému poškodeniu. To nastáva v dôsledku opakovaného cyklického zaťaženia a môže viesť k porušeniu štruktúry materiálu a následne k zlyhaniu celého stroja. Náš hriadeľ je vyrobený s ocele 11 370. V tabuľkách sa pre náš materiál uvádzajú hodnoty: [27]

- Medz klzu $\sigma_{kt} = 200$ MPa
- Medz pevnosti $R_m = 370$ MPa
- Medz únavy v ohybe $\sigma_{oc} = 160$ MPa
- Medz únavy v krute $\tau_{kc} = 95$ MPa

a) Bezpečnosť voči medznému stavu pružnosti [28]

Bezpečnosť voči medznému stavu pružnosti charakterizuje schopnosť materiálu odolávať zaťaženiu bez toho, aby došlo k nevratným deformáciám. Konštrukcie sa posudzujú na základe medze klzu. Medz klzu predstavuje hodnotu napätia, pri ktorej sa materiál začne nevratne deformovať. Preto sa práve táto hodnota používa na určenie bezpečnosti voči medznému stavu pružnosti. Ak sa materiál nachádza pod touto hodnotou považuje sa za bezpečný a môže byť použitý v aplikáciách. Aby sme zistili, či bude v našom prípade táto podmienka splnená prejdeme k výpočtu.

Ako prvé si musíme vypočítať krútiaci a ohybový moment:

$$M_k = \frac{P}{2\pi n} = \frac{100 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 6000} = 0,159 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (5.9)$$

$$M_o = F_{max} \cdot l = 69,9 \cdot 0,02 = 1,398 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (5.10)$$

A následne z nich vypočítame napätia.

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi d^3}{16}} = \frac{16M_k}{\pi d^3} = \frac{16 \cdot 0,159}{\pi \cdot (8 \cdot 10^{-3})^3} = 1,58 \text{ MPa} \quad (5.11)$$

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{M_o}{\frac{\pi d^3}{32}} = \frac{32M_o}{\pi d^3} = \frac{32 \cdot 1,398}{\pi \cdot (8 \cdot 10^{-3})^3} = 27,81 \text{ MPa} \quad (5.12)$$

Keďže sa jedná o cyklické kombinované namáhanie následne vypočítame redukované napätie, podľa teórie HMM.

$$\sigma_{red\ HMM} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3\tau^2} = 27,94 \text{ MPa} \quad (5.13)$$

Na záver vypočítame bezpečnosť voči medznému stavu pružnosti:

$$k = \frac{\sigma_{kt}}{\sigma_{red}} = \frac{200}{27,94} \approx 7,2 \quad (5.14)$$

Z výpočtu bezpečnosti voči medznému stavu pružnosti vidíme, že prevádzka so zvoleným hriadeľom a maximálnym nastavením nevývah je bezpečná. Následne si vypočítame bezpečnosť voči medznému stavu únavy.

b) Bezpečnosť voči medznému stavu únavy [28]

Bezpečnosť voči medznému stavu únavy určuje, ako veľmi je materiál odolný voči opakovaným cyklickým zaťaženiam, ako sú vibrácie alebo zmeny teploty. Pri opakovaných zaťaženiach môže dôjsť k únavovému poškodeniu materiálu, ktoré sa prejavuje trhlinami, prasklinami alebo únavovým lámaním. Práve preto si voči tomuto stavu overíme našu sústavu.

Ako prvé vypočítame skutočné medze únavy pre našu hriadeľ, k tomu slúžia vzorce:

$$\sigma_{o skut} = \frac{\sigma_{oc} \varepsilon_m \varepsilon_p}{\beta_k} \quad (5.15)$$

$$\tau_{k skut} = \frac{\tau_{kc} \varepsilon_m \varepsilon_p}{\beta_k} \quad (5.16)$$

Kde β_k predstavuje vrubový súčiniteľ, ε_m predstavuje súčiniteľ veľkosti a ε_p predstavuje súčiniteľ povrchu. Keďže náš hriadeľ nebude obsahovať žiadne vruby, vrubový súčiniteľ bude rovný 1. Pre priemer hriadeľa do 51mm sa súčiniteľ veľkosti ε_m vypočíta ako:

$$\varepsilon_m = 1,24d^{-0.107} = 1,24 \cdot 8^{-0.107} = 0,99 \quad (5.17)$$

Kde d je priemer hriadeľa v mm. Ďalej potrebujeme vypočítať súčiniteľ povrchu ε_p . Ten sa vypočíta pomocou vzťahu:

$$\varepsilon_p = aR_m^b = 4,51 \cdot 370^{-0.265} = 0,94 \quad (5.18)$$

Kde hodnota R_m je medz pevnosti v MPa a koeficienty a , b sa v tabuľkách pre obrábanú hriadeľ uvádzajú $a = 4,51$ a $b = -0,265$.

Keďže sme si určili všetky potrebné súčinitele, sme schopní vypočítať skutočné medze únavy:

$$\sigma_{o skut} = \frac{\sigma_{oc} \varepsilon_m \varepsilon_p}{\beta_k} = \frac{160 \cdot 0,99 \cdot 0,94}{1} = 149,9 \text{ MPa} \quad (5.19)$$

$$\tau_{k skut} = \frac{\tau_{kc} \varepsilon_m \varepsilon_p}{\beta_k} = \frac{95 \cdot 0,99 \cdot 0,94}{1} = 88,4 \text{ MPa} \quad (5.20)$$

Z toho sme ďalej schopní vypočítať dynamické bezpečnosti pre jednotlivé zložky zaťaženia ako:

$$k_{d\sigma} = \frac{\sigma_{o skut}}{\sigma_o} = \frac{149,9}{27,81} = 5,4 \quad (5.21)$$

$$k_{d\tau} = \frac{\tau_{k skut}}{\tau_k} = \frac{88,4}{1,58} = 55,9 \quad (5.22)$$

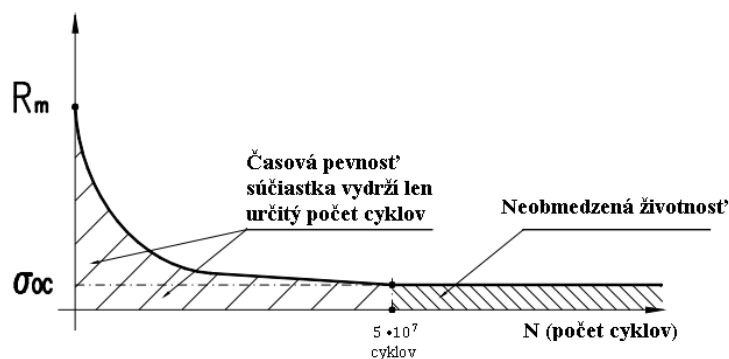
Výsledná dynamická bezpečnosť sa vypočíta ako:

$$\frac{1}{k_d^2} = \frac{1}{k_{d\sigma}^2} + \frac{1}{k_{d\tau}^2} \quad (5.23)$$

Po následnej úprave dostávame výsledný tvar:

$$k_d = \frac{k_{d\sigma} \cdot k_{d\tau}}{\sqrt{k_{d\sigma}^2 + k_{d\tau}^2}} = \frac{5,4 \cdot 55,9}{\sqrt{5,4^2 + 55,9^2}} \approx 5,4 \quad (5.24)$$

Opäť nám vyšlo, že hriadeľ budiča je bezpečná a odolná voči opakovému cyklickému zaťaženiu. Z Wöhlerovej krivky (obr. 5.7) vidíme, že hriadeľ má neobmedzenú životnosť, keďže zaťaženie sústavy je menšie ako medz únavy.



Obr. 5.7. Wöhlerova krivka [28]

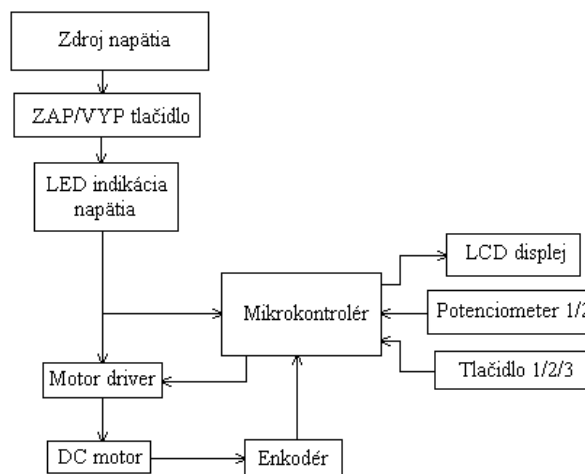
Na obrázku 5.8 môžeme vidieť výsledný návrh budiča. V ďalšej kapitole sa pozrieme na návrh ovládacej časti vibračného budiča.



Obr. 5.8. Výsledný návrh konštrukcie budiča

5.2 Návrh ovládacej časti vibračného budiča

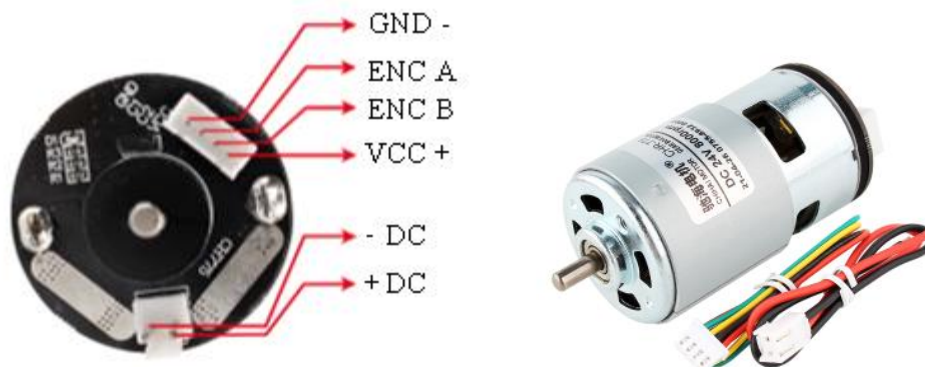
V tejto kapitole sa pozrieme na návrh ovládacej časti budiča. Návrh vychádza z potreby riadiť rýchlosť otáčania spomínaného motoru. Na obrázku 5.9, môžeme vidieť blokovú schému prepojenia jednotlivých ovládacích štruktúr. Ako prvé môžeme vidieť zdroj napätia. Ten nám poslúži na napájanie motoru a samozrejme aj celej ovládacej časti. Ďalej bude použitý kolískový vypínač, pomocou ktorého dokážeme jednoducho celé zariadenie zapnúť alebo vypnúť. Ak bude systém pod napätím bude nás o tom informovať LED indikácia. Ďalej budú použité ovládacie prvky ako tlačidlá a potenciometre, vďaka ktorým bude môcť obsluha nastavovať požadované hodnoty pre motor. Pre zobrazovanie nastavených hodnôt bude použitý LCD displej. Nastavené hodnoty budú vstupovať do mikrokontroléru, ktorý na základe nich bude prevádzať výpočty a následne ovládať motor pomocou motor driveru. Ten slúži na riadenie otáčok a smeru otáčania motora. Umožňuje riadiť rýchlosť a smer pomocou digitálnych signálov. Ako posledné v schéme môžeme vidieť enkodér, ktorý je súčasťou motora. Enkodér je zariadenie, ktoré nám umožňuje sledovať otáčky motora a jeho presnú polohu, čo nám umožňuje vytvoriť uzavretú regulačnú slučku (PID) a tým zabezpečiť presné riadenie motora. Týmto spôsobom je zabezpečená presná kontrola pohybu s presnou a rýchlou reakciou na meniace sa podmienky.



Obr. 5.9. Bloková schéma sústavy

Ďalej si povieme trochu viac o najdôležitejších elektrických súčiastkach, ktoré budú využité pri návrhu ovládacej časti budiču. A to konkrétne:

- a) 24V DC motor 775 s enkodérom
 - b) Motor driver TB67H420FTG
 - c) Arduino UNO
 - d) I2C LCD displej
- a) 24V DC motor 775 s enkodérom – Jedná sa o DC motor, ktorý sa používa v rôznych aplikáciách, kde je potrebná vysoká rýchlosť otáčania a presné ovládanie otáčok a polohy. Jeho nízka cena a vysoká spoľahlivosť robia z neho ideálnu voľbu pre rôzne projekty. Často je využívaný v robotike, automatizácii, CNC strojoch alebo v ďalších projektoch, kde je potreba presného ovládania pohybu. Na obrázku 5.10, môžeme vidieť motor a popis jednotlivých pinov enkodéru. Konkrétne sa jedná o inkrementálny magnetický enkodér, ktorý ma výhodu oproti optickým enkodérom v tom, že je odolný voči prachu, vlhkosti a hlavne vibráciám. Čo z neho robí ideálnu voľbu pre naše použitie. Enkodér pozostáva z dvoch častí a to stacionárneho senzoru a rotujúceho disku s magnetickými poľami. Tie sú rovnomerné rozmiestnené po disku. Pri rotácii disku sa snímané magnetické signály menia a senzor generuje informáciu o zmene polohy v čase. [25]

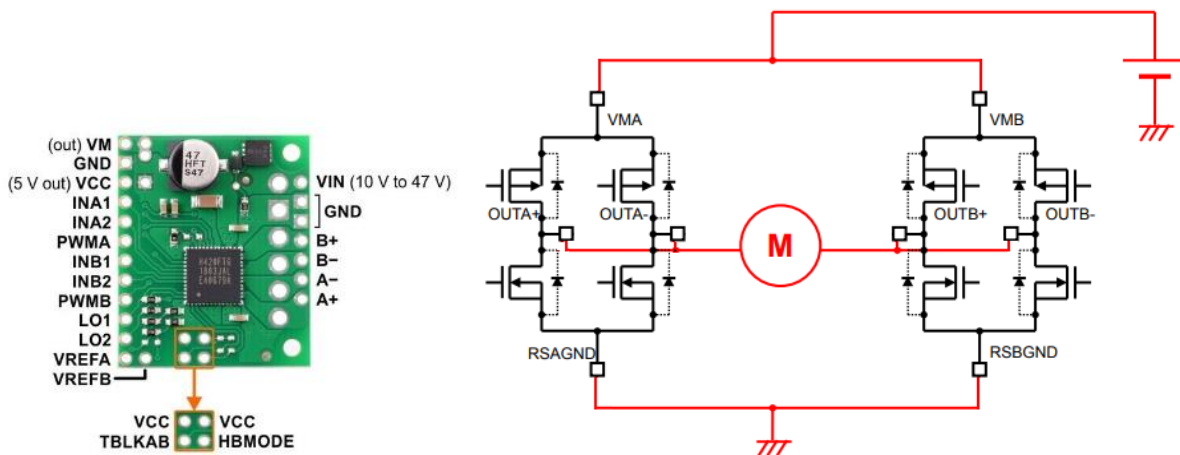


Obr. 5.10. DC motor 775 s enkodérom [25]

Pripojenie motoru s enkodérom k mikrokontroléru je veľmi jednoduché. Motor je napájaný z externého zdroja napätia 24V DC. Enkodér má vlastné piny, ktoré slúžia na napájanie z mikrokontroléru a to konkrétne GND a VCC. Signály A a B sa líšia v čase a fáze. Ak sa motor otáča v smere hodinových ručičiek signál A predbieha signál B ak sa motor otáča opačne signál B predbieha signál A. Tieto signály sú vysielané z enkodéra na mikrokontrolér, kde sa určujú otáčky a poloha motora. Enkodér produkuje 17 impulzov na otáčku, to je potrebné vedieť pri určovaní rýchlosti otáčania. [25]

- b) Motor driver TB67H420FTG – Jedná sa o vysokonapäťový dvojkanálový motorový ovládač, ktorý je určený na ovládanie DC a krokových motorov. Používa sa najmä v robotike, automatizácii a v rôznych aplikáciách, kde je potrebné presné ovládanie rýchlosti a smeru motora. Zvláda široké spektrum vstupných napätí a to až do 50V. To z neho robí ideálnu variantu pre ovládanie rôznych typov motorov. Taktiež poskytuje niekoľko ochranných funkcií, ako napríklad ochrana proti prúdovému zaťaženiu, tepelnú ochranu a ochranu pred nízkym napätím. Všetky tieto ochranné funkcie pomáhajú

zabezpečiť spoľahlivý chod spomínaného motoru. Zároveň ponúka širokú škálu konfiguračných možností vrátane mikrokrokovania a nastaviteľného obmedzenia prúdu, ktoré nám umožňuje jemné ovládanie rýchlosti motora. Ďalším z benefitov tohto ovládaču je jeho kompatibilita s mnohými mikrokontrolermi, vrátane platformy Arduino. Môže slúžiť k ovládaniu dvoch motorov ale taktiež dokáže ovládať iba jeden motor. Pri použití zapojenia s jedným motorom dokáže ovládač v kontinuálnom režime dodávať prúd až do 3,4 A a v špičkovom režime až do 9 A. Kontinuálny prúd predstavuje hodnotu prúdu, ktorú dokáže ovládač bezpečne dodávať motoru po dlhú dobu bez toho aby došlo k prehriatiu ovládača. Špičkový prúd predstavuje hodnotu prúdu, ktorá sa objavuje iba v krátkodobých špičkách záťaže. Takýto stav môže nastať napríklad pri rozbiehaní motora alebo pri prekonávaní prekážky. Jednotlivé piny ovládaču a zapojenie s jedným motorom môžeme vidieť na obrázku 5.11. [29]



Obr. 5.11. Popis pinov a zapojenie s jedným motorom [29]

V našom zapojení nebudeme využívať všetky piny, keďže realizované zapojenie bude iba s jedným motorom. Na pravej strane môžeme vidieť piny VIN a GND tieto piny budú napájané z externého DC zdroja 24V. Piny B+ a B- budú spojené a povedú na motor. To isté sa vykoná s pinmi A. Pre definovanie pracovného módu ovládača sa používajú piny VCC a HBMODE. Ak nie sú tieto piny prepojené ovládač pracuje v móde s dvoma motormi. V našom prípade použijeme na prepojenie týchto pinov skratovací jumper. Ďalej budeme používať pin INA 1, ktorý bude slúžiť ako riadiaci signál pre piny A- a A+. Rovnako pin INA 2 bude slúžiť ako riadiaci signál pre piny B- a B+. Ako posledný použijeme pin PWMA, ktorý predstavuje PWM vstup pre riadenie rýchlosti motora. [29]

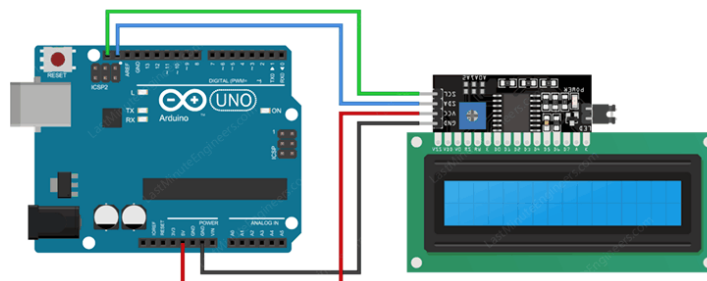
c) Arduino UNO – Predstavuje open-source dosku mikrokontroléru, ktorá je založená na ATmega328P. Je určená pre začiatočníkov ale jej použitie ocenia aj pokročilejší používatelia. Nízka cena a jednoduchosť použitia robia z tejto dosky ideálne nástroj pre všetkých, ktorí sa zaujímajú o elektroniku, robotiku, automatizáciu a DIY projekty. Doska obsahuje 14 digitálnych vstupno/výstupných pinov, 6 analógových vstupov, 16 MHz quartzový kryštál, USB pripojenie, napájací konektor a ICSP hlavičku na programovanie. Má tiež resetovacie tlačidlo a LED na indikáciu napájania a stavu. Taktiež je kompatibilné s veľkým množstvom senzorov, aktuátorov a iných elektronických komponent. Programovanie tejto dosky prebieha pomocou programovacieho jazyku C++ vo vývojovom prostredí Arduino IDE, čo je software, ktorý umožňuje obsluhu písať, kompilovať a nahrávať kódy na dosku. Toto vývojové prostredie obsahuje množstvo knižníc a funkcií, ktoré nám uľahčujú prácu a zrýchľujú čas potrebný na realizáciu rôznych projektov. Ďalšou

výhodou, ktorú Arduino ponuka je množstvo návodov a veľká online komunita ľudí, vďaka ktorej dokážeme jednoducho nájsť riešenie na väčšinu problémov. [30]



Obr. 5.12. Arduino UNO [31]

- d) I2C LCD displej – Jedná sa o obľúbený zobrazovací nástroj pre Arduino a iné mikrokontroléry. Keďže v práci potrebujeme zobrazovať nastavené hodnoty frekvencií použijeme práve tento grafický výstup. Zvolený LCD displej obsahuje 16x2 zobrazovacích znakov, ktoré umožňujú zobrazovať text, čísla, symboly a ikony. Pripojenie k Arduino je možné realizovať dvoma spôsobmi pripojenie pomocou 16 pinového konektora alebo pomocou obvodu PCF8574. Pre úsporu vodičov bude použité pripojenie pomocou obvodu PCF8574. Tento obvod používa I2C (Inter-Integrated Circuit), čo je sériová komunikačná zbernica, ktorá umožňuje prenos dát medzi rôznymi zariadeniami. K tomu používa iba dva piny a to SDA (data line) a SCL (clock line). Pripojenie s Arduino môžeme vidieť na obrázku 5.13. Pin SDA sa pripojí na pin Arduino A4 a pin SCL na pin A5. Piny VCC a GND slúžia na napájanie. Komunikácia s displejom prebieha pomocou knižnice Wire.h, táto knižnica umožňuje posielanie a prijímanie dát pomocou I2C zbernice. Ako ďalšia knižnica sa používa LiquidCrystal_I2C.h, tá poskytuje funkcie pre ovládanie zobrazovania na displeji. Obsahuje funkcie na nastavenie kurzoru, výber riadku, zapnutie podsvietenia a mnoho ďalších. Používanie týchto knižníc nám výrazne zjednoduší programovanie displeja. [31]

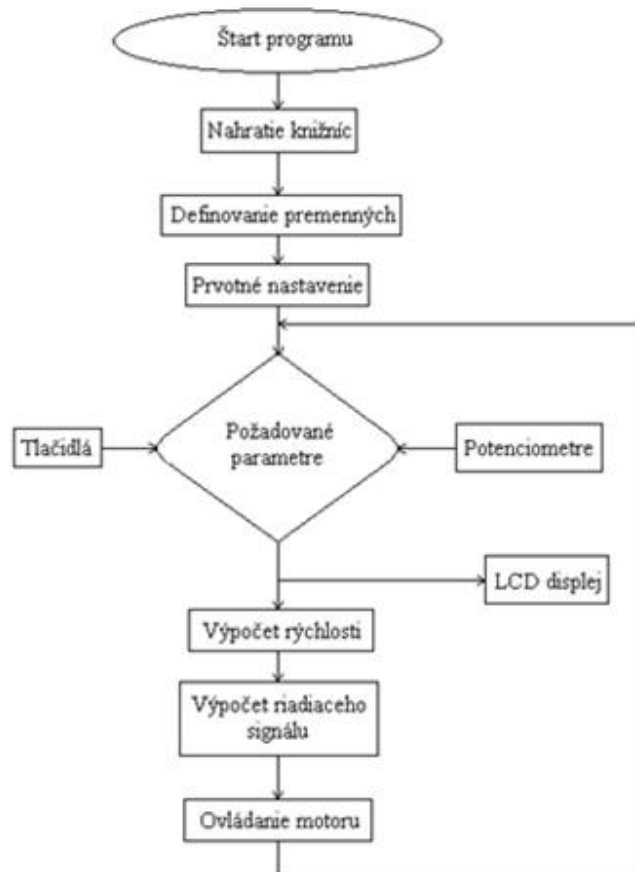


Obr. 5.13. Pripojenie displeju k Arduino pomocou obvodu PCF8574 [31]

Toto boli najdôležitejšie elektronické súčiastky, ktoré budú potrebné pre ovládanie motoru. V ďalšej kapitole sa pozrieme na program, ktorý bude riadiť celý systém.

5.3 Popis programu

Program je jadrom celého riadiaceho obvodu. Zohráva kľúčovú úlohu pri riadení výkonu a rýchlosti motoru. Jeho úlohou je spracovávať vstupné signály z enkodéru a ovládacích prvkov. A následne riadiť výstupné signály pre motor, tak aby dosiahol požadované otáčky. Na obrázku 5.14 môžeme vidieť blokovú schému programu.



Obr. 5.14. Bloková schéma programu

Ako prvé je potrebné naimportovanie jednotlivých knižníc. Tie slúžia na to aby nám uľahčili programovanie. Ako už bolo v predchádzajúcej kapitole spomenuté ako prvé si naimportujeme knižnicu „Wire.h“, tá slúži na komunikáciu a prácu so zbernicou I2C. Ďalej treba naimportovať knižnicu „LiquidCrystal_I2C.h“, ktorá slúži na prácu s LCD displejom. Všetky tieto knižnice sú voľne stiahnuteľné na oficiálnych stránkach Arduina.

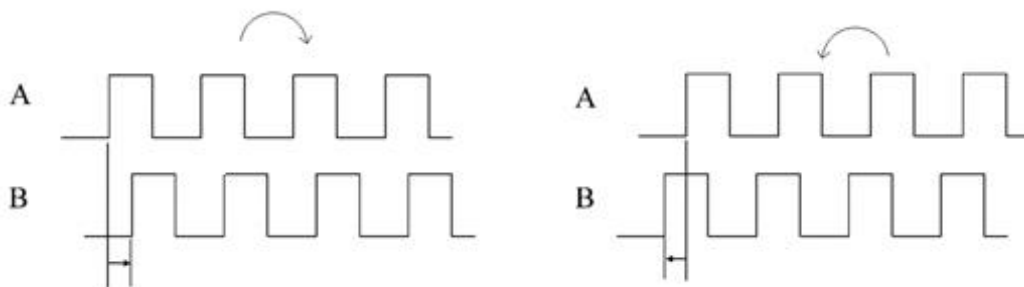
Následne si v programe definujeme jednotlivé premenné, ktoré budú neskôr slúžiť na ovládanie a výpočty. Nasleduje funkcia „setup()“, to je jedná z dvoch základných funkcií. Táto funkcia sa spúšťa iba raz pri spustení programu a slúži na inicializáciu periférií a nastavenie počiatočného stavu programu. Táto smyčka taktiež obsahuje funkciu „attachInterrupt()“. Tá slúži na vyvolanie prerušenia ak dôjde k určitému stavu. V našom prípade sa vykoná prerušenie ak dôjde k zmene signálu na digitálnom pine pripojenému k enkodéru. Prerušenie sa spustí, keď sa signál z enkodéru zmení z nízkej úrovne (LOW) na vysokú úroveň (HIGH). Následne sa vykoná funkcia „readEncoder()“.

Ďalšia časť programu je funkcia „loop()“, ktorá je takzvaná nekonečná smyčka. Táto funkcia obsahuje hlavnú časť kódu, ktorý sa neustále opakuje až pokiaľ sa kód nezastaví. Všetky nasledujúce úkony plní táto funkcia. Základná úloha tejto funkcie je napríklad čítanie vstupov z enkodéru, tlačidiel a potenciometrov. To sa vykonáva pomocou funkcií „digitalRead()“ a „analogRead()“, záleží od druhu informácie. Po prečítaní vstupov sa tieto informácie môžu rôzne spracovávať. Môžu sa s nimi vykonávať rôzne matematické a logické operácie.

Použitím logickej operácie „if()“, si definujeme maximálnu a minimálnu rýchlosť motora. Medzi týmito hodnotami dokážeme motor ovládať pomocou potenciometrov a tlačidiel.

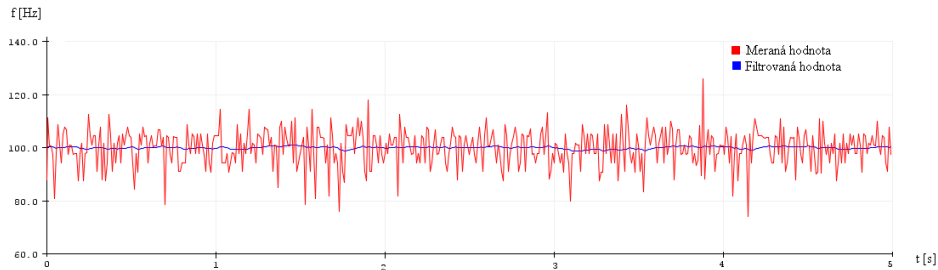
Ďalej je potrebné vypočítať rýchlosť motoru. K tomu nám poslúži funkcia readEncoder(). Tá ma za úlohu odčítať hodnotu z enkodéru. Enkodérové impulzy sa generujú pri otáčaní hriadeľa motora a predstavujú zmeny polohy. Pri každom impulze detekujeme nábežnú hranu, na základe toho sme následne schopní vypočítať aktuálnu rýchlosť alebo polohu. Informácia o aktuálnej rýchlosti sa ďalej používa ako vstup pre PID regulátor. Funkcia readEncoder() je volaná v každom cykle programu, tak aby sme mali aktuálnu informáciu o rýchlosti a mohli ju použiť k regulácii motora. Vzhľadom na to, že je táto funkcia volaná z prerušenia musí byť rýchla a efektívna, tak aby nevznikali problémy s chybným zaznamenávaním polohy.

Na obrázku 5.15 môžeme vidieť generovanie signálov z enkodéru. Ako už bolo napísané, tieto signály sa líšia v čase a fáze. Ak sa motor otáča v smere hodinových ručičiek signál A predbieha pred signálom B. Ak sa motor otáča v protismere hodinových ručičiek signály sú opačné. Na základe toho dokážeme určiť smer rotácie motora, otáčky alebo prípadne polohu hriadeľa motora.



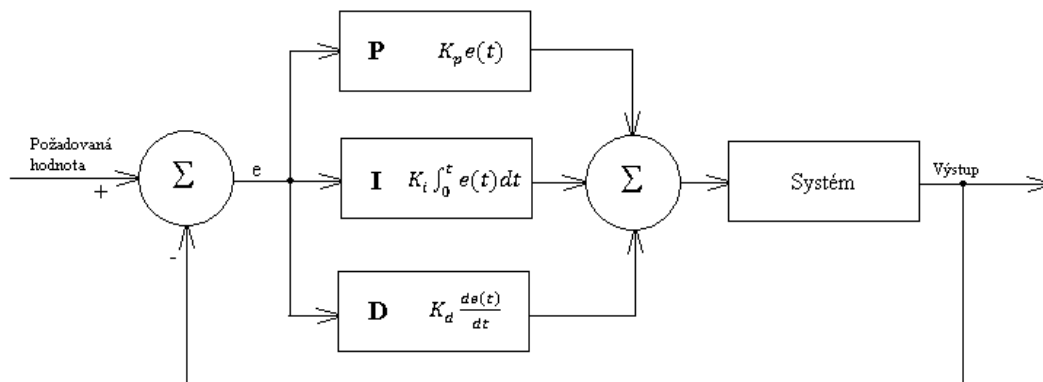
Obr. 5.15. – Určenie smeru otáčania motora pomocou signálu z enkodéra

Signál z enkodéru môže byť často rušený rôznymi druhmi šumu, ktoré môžu spôsobiť nespresnené odčítanie rýchlosti motora. Šum môže byť spôsobený napríklad elektromagnetickým rušením, vysokými frekvenciami, nesprávnym zapojením alebo nesprávnou kalibráciou enkodéru. Filtrovanie signálu z enkodéru pomocou low-pass filtru môže pomôcť znížiť úroveň šumu a zlepšiť presnosť merania rýchlosti motora. Low-pass filter taktiež odstráni nežiadúce vysokofrekvenčné zložky zo signálu, ktoré môžu byť spôsobené šumom a tým zvýšiť presnosť merania rýchlosti. V prípade použitia PID regulátora na riadenie motora nám filtrácia signálu z enkodéru môže pomôcť zabezpečiť, že regulátor správne zaregistruje zmeny v rýchlosti motora. A následne regulátor vykoná potrebné korekcie, aby udržal motor v požadovanej rýchlosti. Na obrázku 5.16 môžeme vidieť filtrované a surové dáta z enkodéru.



Obr. 5.16. Filtrácia signálu

V tento moment už dostávame informáciu o rýchlosti vo filtrovanom tvare a môžeme sa presunúť k PID regulácii. PID regulátor je jeden z najbežnejších typov regulátorov používaných v priemyselných a automatizačných aplikáciách. Jeho úlohou je udržiavať sledovanú veličinu na požadovanej hodnote tým, že mení akčný signál, ktorým riadi akčný prvok. Na obrázku 5.17 môžeme vidieť princíp, na základe ktorého regulátor pracuje.



Obr. 5.17. PID regulátor

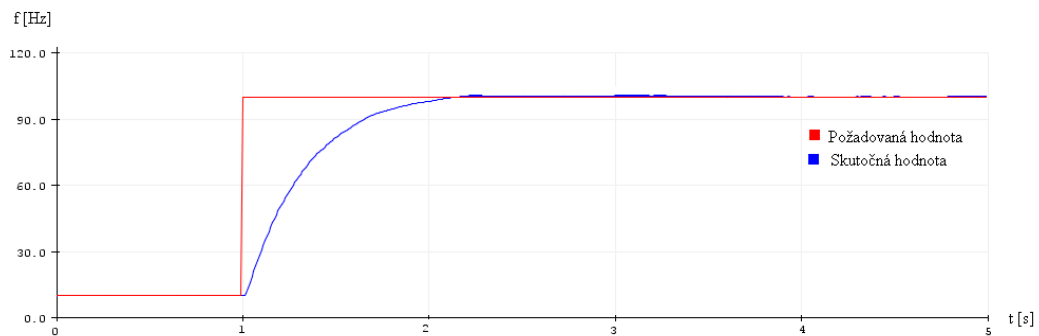
Proporčná zložka regulátora zosilňuje chybu medzi požadovanou hodnotou a aktuálnou hodnotou sledovanej veličiny. Nastavenie tejto zložky závisí od citlivosti systému a požiadaviek na reguláciu. Všeobecne platí, že čím väčšia chyba, tým väčšie zosilnenie je potrebné.

Integračná zložka regulátora znižuje zostávajúcu chybu a zabraňuje prekročeniu požadovanej hodnoty. Integračný člen integruje chyby v čase a zvyšuje zosilnenie v závislosti na dĺžke trvania chyby. Nastavenie správnej hodnoty integračného členu závisí od rýchlosti, s akou sa systém môže prispôbiť chybám.

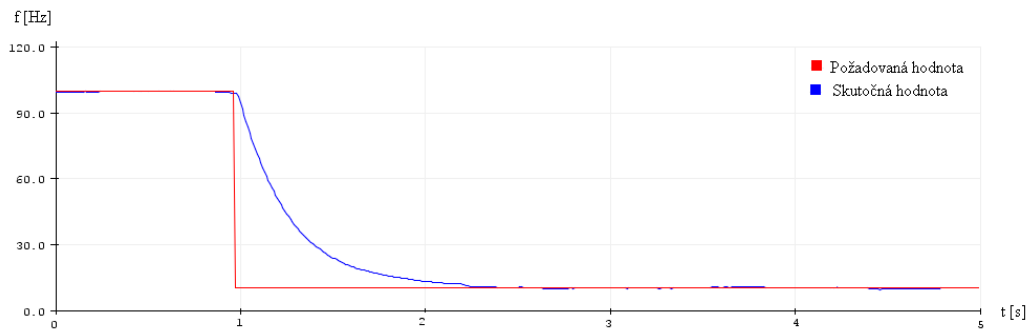
Derivačná zložka regulátora predvída budúce chyby na základe rýchlosti zmeny aktuálnej chyby a znižuje oscilácie systému. Nastavenie správnej hodnoty derivačného členu závisí od dynamiky systému a zmeny rýchlosti sledovanej veličiny. Ale taktiež použitie derivačnej zložky môže priniesť niekoľko problémov. Jedným z problémov je citlivosť na šum. Derivácia môže zvýšiť šum v signály. Ak sa vyskytnú náhle zmeny v regulačnej chybe, derivácia zareaguje. A to môže viesť k príliš agresívnemu riadeniu a nestabilite systému. V našom prípade sme sa rozhodli použiť iba PI regulátor, ale program je nachystaný aj na využitie derivačnej zložky.

Hodnoty jednotlivých členov PI regulátoru sme sa snažili iteratívne vyladiť tak aby pri regulácii nedochádzalo k prekmitom, ale zároveň aby bola regulácia dostatočne rýchla. Regulátor nastavujeme podľa odozvy na skok požadovanej hodnoty. Ako prvé si musíme nastaviť proporcionálnu zložku. Integračnú aj derivačnú zložku nastavíme na nulu a proporcionálnu

zložku nastavíme na nízku hodnotu. Zosilnenie P zložky postupne zväčšujeme až do momentu keď bude mať odozva žiadaný priebeh. Následne hodnotu P zložky znížime na 75% predchádzajúcej hodnoty a postupne zvyšujeme integračnú zložku. Zvyšovanie integračnej zložky vykonávame dovtedy až odstránime trvalú regulačnú odchýlku. Následne ešte môžeme jemne doladiť proporcionálnu zložku. Tým dosiahneme žiadanú odozvu systému na skokovú zmenu požadovanej veličiny. V tento moment máme PI regulátor dokončený. Ak by sme chceli použiť PID regulátor, derivačnú zložku sa odporúča nastaviť na 10% integračnej zložky. Ale je tu možnosť, že derivačná zložka zhorší reguláciu. To sa stalo aj v našom prípade a preto sme sa rozhodli derivačnú zložku vypnúť a teda používať iba PI regulátor. Hodnota proporcionálnej zložky regulátoru je v našom prípade 1,55 a hodnota integračnej zložky 1,95. Na obrázku 5.18 a 5.19, môžeme vidieť regulácia systému pri skokových zmenách.



Obr. 5.18. Regulácia systému pri skokovej zmene z 10Hz na 100Hz



Obr. 5.19. Regulácia systému pri skokovej zmene z 100Hz na 10Hz

Na záver funkcia `void setMotor(int dir, int pwmVal, int pwm, int in1, int in2)` slúži na riadenie motora pripojeného k Arduino. Úlohou tejto funkcie je nastaviť rýchlosť a smer pohybu motora. Jednotlivé vstupy do funkcie predstavujú:

- `dir` určuje smer pohybu motora. Ak je táto hodnota rovná 1, motor sa bude pohybovať vpred, ak je táto hodnota rovná -1, motor sa bude pohybovať vzad.
- `pwmVal` určuje rýchlosť pohybu motora. Táto hodnota sa pohybuje v rozsahu od 0 do 255, pričom 0 znamená, že motor sa nebude pohybovať, a 255 znamená maximálnu rýchlosť pohybu.
- `pwm` určuje pin, na ktorom sa nachádza signál PWM pre motor.
- `in1` a `in2` určujú piny, ktoré ovládajú smer pohybu motora.

6 VÝROBA ZARIADENIA

Ako prvé si zrekapitulujeme, aké komponenty budú použité k skonštruovaniu mechanickej konštrukcie stolu:

Množstvo [ks]	Názov
2	Noha (IPE profil 220)
4	Spodná úchytká (plochá tyč 100x6x38mm)
1	Nosník (plochá tyč 80x6x1260mm)
2	Príložka (plochá tyč 130x10x110mm)
1	Montážna doska (plochá tyč 150x10x150mm)
8	Skrutka M8
4	Skrutka M10
4	Skrutka M6

Tabuľka 6 – Použité komponenty na konštrukciu stola

V tabuľke 6 vidíme všetky potrebné komponenty na zostavenie konštrukcie stolu. Ako prvé musíme upraviť rozmery dodaného materiálu tak, aby mali nami požadované rozmery. Na to použijeme pásovú pílu. Po úprave rozmerov je potrebné obrúsiť všetky hrany tak, aby neboli ostré a nepredstavovali nebezpečenstvo pre obsluhu. Montážnu dosku prizvárame na stred k nosníku, aby sme následne mohli vyvrtáť dokonale prechodné diery. Zároveň prizvárame spodné úchytky k IPE nohám. Pomocou týchto úchytiiek sa pripevnia nohy k podstave. Na zváranie použijeme CO₂ zvaračku. Zvary opäť obrúsime. Ďalej si navštívame všetky potrebné diery. Rozmery dier pod závitov volíme podľa tabuliek. Pre uchytenie nosníku bude v IPE profile štyrikrát závit M8, zároveň v jednom IPE profile vyvrtáme dve diery na uchytenie ovládacej krabičky. V montážnej doske narežeme desať závitov M6. Štyri závitov budú slúžiť pre pripevnenie vibračného budiča, zvyšné budú slúžiť na prípadné pripevnenie testovacieho objektu. Na záver sme konštrukciu nastriekali farbou. Následne môžeme celú konštrukciu poskladať a pripevniť na podstavu v učebni (obr. 6.1). V tento moment už máme poskladanú celú konštrukciu stola a následne sa presunieme ku konštrukcii vibračného budiča.



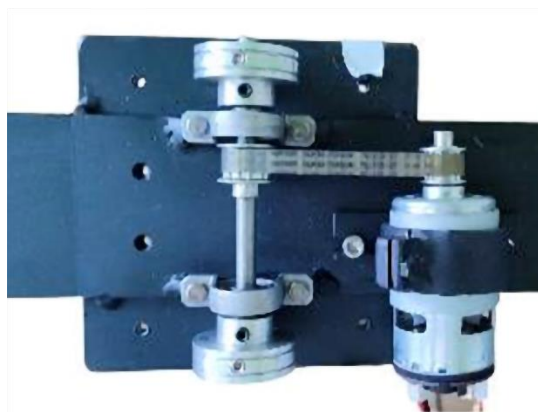
Obr. 6.1. Konštrukcia stola

Vibračný budič bude umiestnený zosponu v strede stola. Komponenty na skonštruovanie vibračného budiča môžeme vidieť v tabuľke 7.

Množstvo [ks]	Názov
1	DC motor 775
1	Motorová objímka
1	Hriadeľ $\phi 8 \times 140$
2	Ložisko KP08
1	Remenica 21 T5/10
1	Remenica 21 T5/12
1	Ozubený remeň 10 T5/200
2	Nevývaha
4	Skrutka M6
2	Nastavovacia skrutka M6

Tabuľka 7 – Použité komponenty na konštrukciu vibračného budiča

Na hriadeľ motora bude nalisovaná remenica 21 T5/10. Motor vložíme do objímky a pomocou sťahovacej skrutky ho tam na pevno prichytíme. Rovnako ako na hriadeľ motoru aj na hriadeľ budiča nalisujeme remenicu 21 T5/12. Rozmery dier v remenicách volíme podľa strojníckych tabuliek. Následne sa na hriadeľ pripevnia ložiskové jednotky KP08 pomocou nastavovacích skrutiek, ktoré sú súčasťou ložiskových jednotiek. Ako posledné musíme na hriadeľ pripevniť nevyváhu. Tie budú rovnako ako ložiská pripevnené pomocou nastavovacích skrutiek. V tento moment máme celý budič zostavený posledné, čo ostáva je na remenice nahodiť remeň a následne pripevniť budič na konštrukciu stola. Ložiská sa pripevnia ku konštrukcii stolu pomocou štyroch skrutiek M6. Motorová objímka sa taktiež ku konštrukcii pripevní pomocou dvoch skrutiek M6. V objímke sú vyrobené drážky, tak aby sme ňou dokázali hýbať a tým šponovať remeň. Na záver sme celý budič zvažili a zistili sme, že jeho hmotnosť je 830 g. Čím sme splnili požiadavku maximálnej hmotnosti 1 kg. Zostavený a namontovaný budič na konštrukcii stolu môžeme vidieť na obrázku 6.2.



Obr. 6.2. Budič vibrácií

Ako posledné musíme navrhnuť ovládaciu krabičku a uchytenie jednotlivých ovládacích súčiastok v krabičke. Po zmeraní rozmerov všetkých komponent sa vrhneme na návrh ovládacej krabičky. Krabička bude vyrobená pomocou 3D tlače na tlačiarni Prusa MINI. Krabičku

navrhne v programe Inventor a následne prevedieme do programu PrusaSlicer. Jedná sa o bezplatný software, ktorý slúži na prípravu modelov na 3D tlač. Software prevezme model a rozdelí ho na tenké vrstvy. Program ponúka množstvo funkcií na nastavenie tlače ako napríklad výška vrstvy, hustota výplne a rôzne podporné štruktúry. Po nastavení požadovaných parametrov tlače software vytvorí súbor, ktorý je nachystaný na 3D tlač.

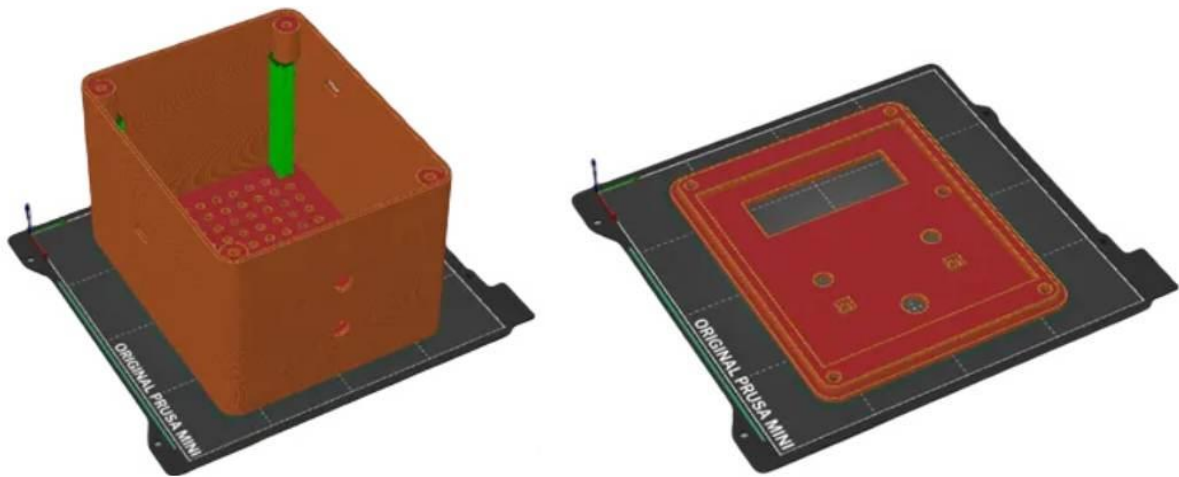
V tabuľke 8 môžeme vidieť všetky komponenty, ktoré bude obsahovať ovládacia krabička.

Množstvo [ks]	Názov
1	Zdroj 24V DC
1	Napájací sieťový adaptér 9V
1	Arduino UNO
1	Motorový ovládač TB67H720FTG
1	LCD displej
2	Potenciometer 10k Ω
3	Tlačidlo
1	Vypínač
1	LED dióda
1	USB adaptér

Tabuľka 8 – Použité komponenty riadenia

Pri konštrukcii musíme myslieť na rozmery jednotlivých prvkov, ktoré pri ovládaní budeme používať. Rozmer krabičky bude 155x125mm, čo je dostatočné aby sa do krabičky zmestili všetky požadované komponenty a zároveň aby sa krabička dala namontovať na nohu stola. V zadnej strane krabičky budú otvory, ktoré budú slúžiť na chladenie všetkých komponent v krabičke. Zospodu krabičky budú dva otvory, ktoré budú slúžiť na pripájacie káble. Po bokoch krabičky sa budú nachádzať dva otvory, jeden bude slúžiť na osadenie vypínaču a druhý na pripájací USB adaptér. Vďaka tomuto adaptéru bude možné upravovať a doladovať kód bez nutnosti otvárať krabičku. Vľavo na obrázku 6.3 môžeme vidieť nastavenie tlače v programe PrusaSlicer. Pre zapustené valčeky sme museli vygenerovať podpory, aby pri tlači nedošlo k deformácii alebo dokonca k zlyhaniu tlače. Tieto valčeky sú jemne zapustené, tak aby viko krabičky dosadlo na valčeky a následne sa pomocou skrutiek k spodku krabičky pripevnilo. Po dokončení tlače je potreba odstrániť podpory a následne do valčekov vyrezať závit. Na tlač bude použitý materiál PLA a čas potrebný na vytlačenie spodku krabičky aj s podporami je 22 hodín.

Na pravom obrázku 6.3 môžeme vidieť viko krabičky. Viko bolo navrhnuté tak aby presne dosadalo na spodok krabičky. Môžeme vidieť nachystané otvory na tlačidlá, LCD displej, potenciometre a LED diódu. Všetky otvory boli navrhnuté na presné rozmery jednotlivých komponent. Na tlač bude opäť použitý materiál PLA. Vrchná časť krabičky nevyžaduje žiadne podpory a čas potrebný je jej vytlačenie je 4,5 hodiny.



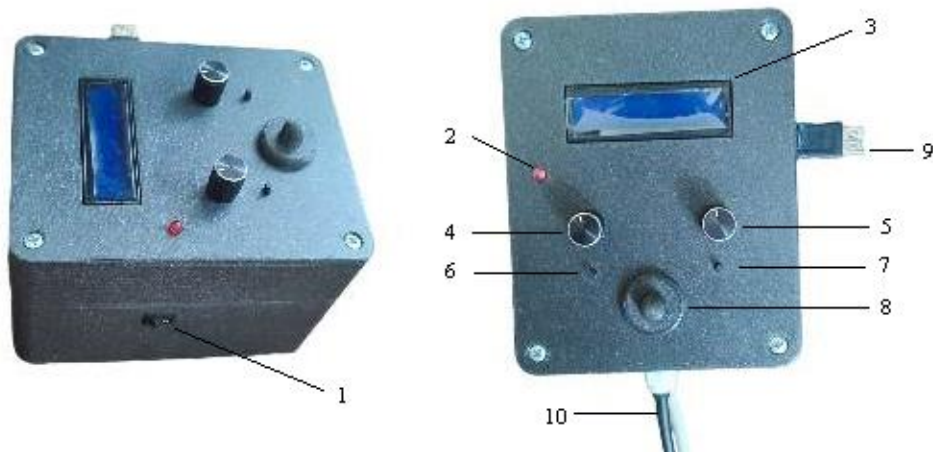
Obr. 6.3. Tlač krabičky

Na napájanie motoru bude použitý zdroj 24V DC to je najväčšia komponenta krabičky. Práve z rozmerov zdroja a rozmerov nohy sústavy sme vychádzali pri navrhovaní krabičky. Veľkosť krabičky musí byť taká aby sa do nej zmestili všetky komponenty ale zároveň aby sa krabička zmestila na nohu stola, kde ma byť namontovaná. Zdroj má dierovaný plechový obal, ktorý slúži k chladeniu zdroja. Tieto diery využijeme na namontovanie ďalších komponent. Konkrétne Arduina a motorového ovládaču. Pre tieto komponenty vytlačíme na 3D tlačiarňi podstavce, ktoré budú slúžiť na pripevnenie k plášťu zdroja.



Obr. 6.4. Pripevnenie radiacích komponent na zdroj

Zdroj aj s ďalšími komponentami osadíme do krabičky. Do prichystaných otvorov vložíme vypínač a USB adaptér. Následne pripevníme k viku všetky potrebné prvky (tlačidlá, potenciometre, LCD displej a LED diódu). Postupne jednotlivé prvky pripojíme k Arduinu. Na záver krabičku uzavrieme pomocou štyroch skrutiek M5. Na obrázku 6.5 vidíme výsledok krabičky s osadenými všetkými komponentami.



Obr. 6.5. Výsledná ovládacia krabička

Označenie	Popis	Označenie	Funkcia
1	Vypínač	6	Tlačidlo +1 Hz
2	LED indikácia zapnutia	7	Tlačidlo -1 Hz
3	LCD displej	8	Resetovacie tlačidlo
4	Nastavovanie jednotiek Hz	9	USB konektor
5	Nastavovanie desatín Hz	10	Pripájacie káble

Tabuľka 9 – Použité ovládacie prvky a ich funkcia

Na obrázku 6.5 vidíme celú krabičku a označenie jednotlivých ovládacích prvkov. Na boku krabičky sa nachádza vypínač, pomocou ktorého dokážeme celý systém zapnúť a vypnúť. Po zapnutí systému sa rozsvieti LED dióda, ktorá nás informuje o tom, že je systém v prevádzke. Taktiež môžeme vidieť LCD displej, ktorý nás informuje o frekvencii, ktorá je pomocou ovládacích prvkov nastavená. Ako ovládacie prvky sú použité dva potenciometre. Ľavý potenciometer nastavuje hodnotu frekvencie v jednotkách, zatiaľ čo pravý potenciometer nastavuje desatiny. Ďalej sú použité dve tlačidlá ľavé tlačidlo pridáva 1Hz a pravé tlačidlo ubera 1Hz. Posledné tlačidlo slúži na resetovanie nastavenia tlačidiel. Kvôli požiadavke aby bola možnosť robiť úpravy v kóde, bez nutnosti otvárania krabičky bol z boku umiestnený USB adaptér. Pomocou neho sa dokážeme veľmi rýchlo pripojiť k Arduino a upravovať tak jeho kód. Na záver krabičku namontujeme na nohu stola (IPE profil).

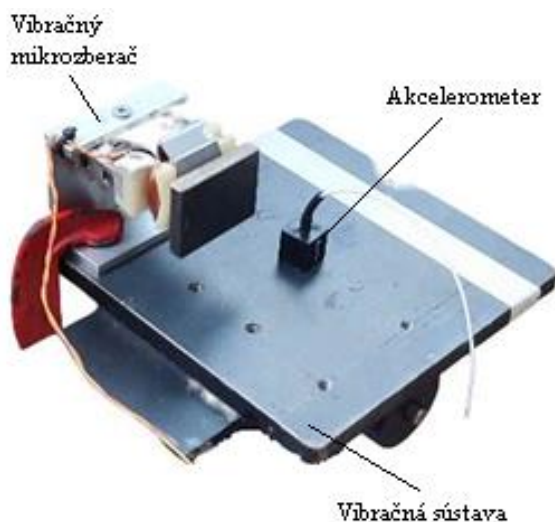
7 TESTOVANIE A VALIDÁCIA VYROBENÉHO ZARIADENIA

V tento moment už máme sústavu osadenú v učebni ako vidíme na obr. 7.1. V strede nosníku je pripevnený akcelerometer, pomocou ktorého budeme merať zrýchlenie sústavy. Jedná sa o jednoosý piezoelektrický akcelerometer „Monitran MTN/1800“. Tento akcelerometer merania zrýchlenia v rôznych rozsahoch, poskytuje vysoké rozlíšenie a široký frekvenčný rozsah. Prepojenie akcelerometra s meracou kartou „cDAQ-9171 National Instruments“ umožňuje sledovanie a analyzovanie priebehu zrýchlenia v reálnom čase pomocou softwaru „SignalExpress“. Tento software nám umožní nielen sledovanie signálov v reálnom čase, ale taktiež poskytuje možnosť uložiť namerané priebehy. Meranie vykonáme pre tri dĺžky nosníku. Aby sme boli schopní popísať správanie systému.



Obr. 7.1. Príprava merania

Sústava, ktorá je predmetom práce má slúžiť ako zdroj vibrácií pre vibračný mikrozbierač. Vibračný mikrozbierač premieňa kinetickú energiu z vibrácií na elektrickú energiu. V práci bude využitý elektromagnetický vibračný mikrozbierač, spôsob uchytenia na sústavu a prípravu merania môžeme vidieť na obrázku 7.2.

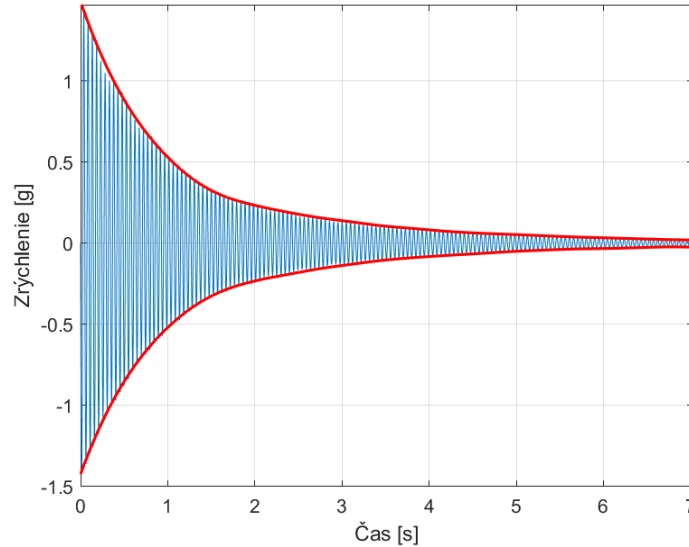


Obr. 7.2. Pripevnenie vibračného mikrozbieraču na vibračnú sústavu

Už sme si popísali všetky potrebné komponenty k meraniu. Následne môžeme prejsť k samotnému meraniu. Prvé merania pre každú dĺžku nosníka budú bez vibračného mikrozbierača a následne meranie vykonáme s vibračným mikrozbieračom.

7.1 Meranie zariadenia s dĺžkou 1 m

Ako prvé sme si nastavili dĺžku nosníku na 1 m, pri tejto dĺžke budeme prevádzať prvé meranie. Najprv si zmeriame odozvu systému po vybudení. Sústava sa vychýli z rovnovážnej polohy a nechá sa voľne kmitať. Na obrázku 7.3, môžeme vidieť odozvu systému na vybudenie. Do grafu bola vykreslená obálka, ktorá bola určená výpočtom.



Obr. 7.3. Odozva sústavy na vybudenie

Po odznení počiatočného prechodového deja, ktorý bol spôsobený vychýlením sústavy sme si odčítali hodnoty amplitúdy zrýchlenia A_t a A_{t+n} . Pričom A_t bola hodnota zrýchlenia v nami zvolenom peaku a A_{t+n} bola hodnota zrýchlenia n-tého nasledujúceho peaku. Následne použitím logaritmického dekrementu sa dokážeme dopočítať k pomernému útlmu sústavy.

Pomerný útlm sústavy vypočítame podľa vzorca:

$$\xi = \frac{1}{2\pi n} \ln \left(\frac{A_t}{A_{t+n}} \right) \quad [-] \quad (7.1)$$

Po dosadení hodnôt zrýchlenia do vzorca dostávame:

$$\xi = \frac{1}{2\pi \cdot 5} \ln \left(\frac{1,2267}{0,9591} \right) = 0,0078 \quad [-] \quad (7.2)$$

Pričom pre obálku kmitania platí:

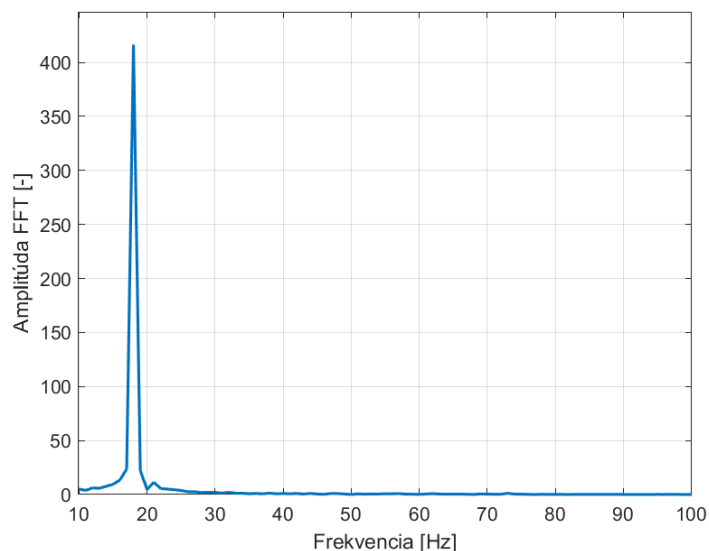
$$A_{t+n} = A_t \cdot e^{-\xi \cdot \Omega_0 \cdot t} \quad (7.3)$$

Taktiež pomocou pomerného útlmu ξ dokážeme vypočítať faktor kvality Q , ktorý sa vypočíta pomocou vzťahu:

$$Q = \frac{1}{2 \cdot \xi} = \frac{1}{2 \cdot 0,0078} = 64,1 \quad [-] \quad (7.4)$$

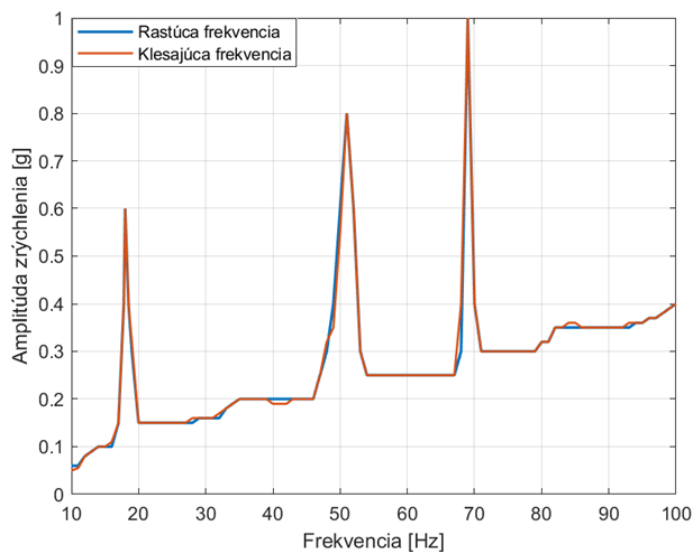
Faktor kvality, vyjadruje ako rýchlo alebo pomaly sa systém ustáli po vybudení. Vyšší faktor kvality znamená menšie tlmenie a dlhšie trvajúce vibrácie. Naopak aj je faktor kvality nižší znamená to väčšie tlmenie a teda rýchlejšie ustálenie systému.

Následne sme si pomocou rýchlej Fourierovej transformácie (FFT) previedli signál do frekvenčnej oblasti. Na obrázku 7.4 vidíme, že sme systém vybudili iba na prvú vlastnú frekvenciu 18 Hz a žiadne sekundárne frekvencie sa neobjavili.



Obr. 7.4. Frekvenčné spektrum vybudenej sústavy

V ďalšom kroku sme nastavili nevývahu tak aby maximálne zrýchlenie dosahovalo 1g. A prešli sme k meraniu amplitudo-frekvenčnej charakteristiky. Ako prvé sme zvyšovali frekvenciu z 10 Hz na 100 Hz (rastúca frekvencia). Ďalej sme zopakovali meranie pre znižujúcu sa frekvenciu a teda z 100 Hz na 10 Hz (klesajúca frekvencia). Po premeraní rozsahov sme dostali závislosť amplitúdy zrýchlenia na frekvencii (obr.7.5).



Obr. 7. 5. A-F charakteristika zrýchlenia

V grafe môžeme vidieť, že obe charakteristiky sú takmer totožné, čo svedčí o tom, že sústava je lineárna. Drobné odchýlky ktoré môžeme vidieť v grafe, môžu byť spôsobené ľudským faktorom pri nepresnom odčítaní hodnoty zrýchlenia. Taktiež z grafu môžeme pozorovať, že v našom rozsahu a teda (10 – 100 Hz) sa vyskytujú tri vlastné frekvencie. Rovnako môžeme vidieť, že dosahované maximálne hodnoty zrýchlenia sú v požadovanom limite zadania (0,1g až 1g). Ak by bola nevývaha umiestnená presne v ťažisku sústavy druhá vlastná frekvencia by sa nemala objaviť. Keďže sa v tomto prípade objavila, dá sa predpokladať, že nevývaha sa nenachádzala presne v ťažisku sústavy a tým vznikla asymetria. Čo spôsobilo objavenie druhej vlastnej frekvencie.

Vlastná frekvencia [Hz]	Dosiahnuté zrýchlenie [g]
18	0,6
51	0,8
69	1

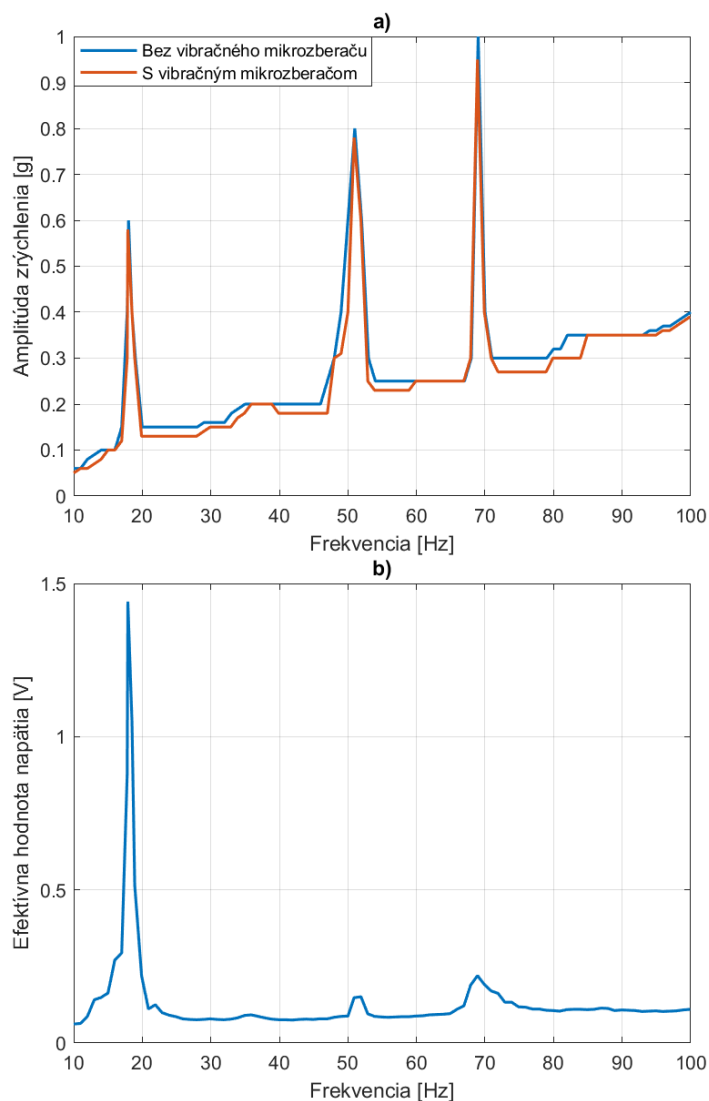
Tabuľka 10 – Dosiahnuté zrýchlenia

Z týchto hodnôt môžeme vypočítať amplitúdu výchylky pomocou vzorca:

$$Y = \frac{a}{\omega} = \frac{a}{2\pi f^2} = \frac{0,6 \cdot 9,81}{(2 \cdot 3,14 \cdot 18)^2} = 0,46 \text{ mm} \quad (7.5)$$

Keďže sa vo vzorci na výpočet amplitúdy výchylky vyskytuje frekvencia s druhou mocninou je jasné, že maximálna výchylka bude pri prvej vlastnej frekvencii a teda 18 Hz.

Následne sme na sústavu pripevnili vibračný mikrozberač (obr. 7.2.), ktorý sme pripojili k osciloskopu. Pomocou osciloskopu sme merali generované napätie mikrozberačom. Bol použitý osciloskop „Rigol MSO5204“.



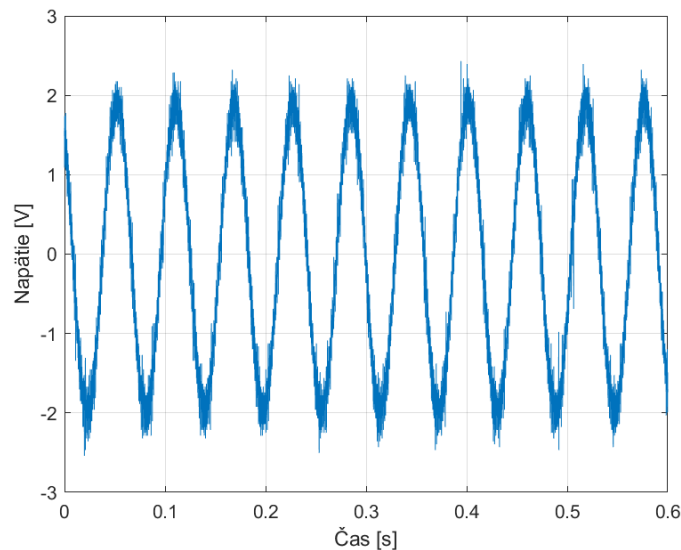
Obr. 7.6. a) Vplyv mikrozberača na správanie sústavy
b) Generované napätie mikrozberačom

Na obrázku 7.6. a), môžeme vidieť správanie sústavy bez vibračného mikrozberaču a s ním. Je zaujímavé, že prídanie mikrozberaču na sústavu spôsobí iba minimálne zníženie amplitúdy zrýchlenia a vlastnej frekvencie.

Na obrázku 7.6. b), môžeme vidieť veľkosť generovaného napätia mikrozberačom v závislosti na frekvencii kmitania. Pri meraní sme postupne menili frekvenciu kmitania a odčítavali hodnoty RMS napätia z osciloskopu. RMS napätie predstavuje efektívnu hodnotu napätia, z anglického „root mean square“. Vlastná frekvencia mikrozberača je 18 Hz. Rovnako ako prvá vlastná frekvencia našej sústavy. Dá sa očakávať, že práve v takomto prípade bude mikrozberač generovať maximálne napätie. V tomto prípade je efektívna hodnota generovaného napätia 1,48 V. Vzťah medzi efektívnou hodnotou a maximálnou hodnotou generovaného napätia je:

$$U_{max} = U_{ef} \cdot \sqrt{2} = 1,48 \cdot \sqrt{2} = 2,1 \text{ V} \quad (7.6)$$

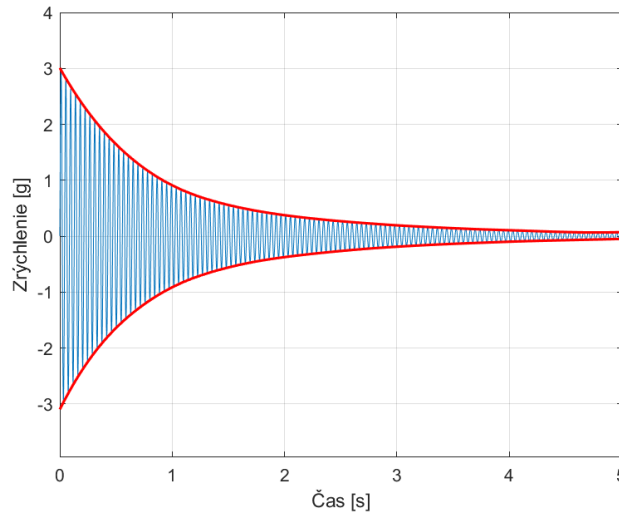
Na záver merania sme si vykreslili priebeh generovaného napätia. Z grafu vidíme, že amplitúda generovaného napätia je 2,1 V.



Obrázok 7.7. Priebeh maximálneho generovaného napätia mikrozberačom

7.2 Meranie zariadenia s dĺžkou 0,9 m

Následne sme si skrátili nosník na 0,9 m a opäť sa pozrieme na správanie sústavy. Dá sa predpokladať, že skrátením nosníku sa nám zvýšia hodnoty vlastných frekvencií. Rovnako ako pri prvom meraní si najprv zmeriame odozvu systému po vybudení.



Obr. 7.8. Odozva sústavy na vybudenie

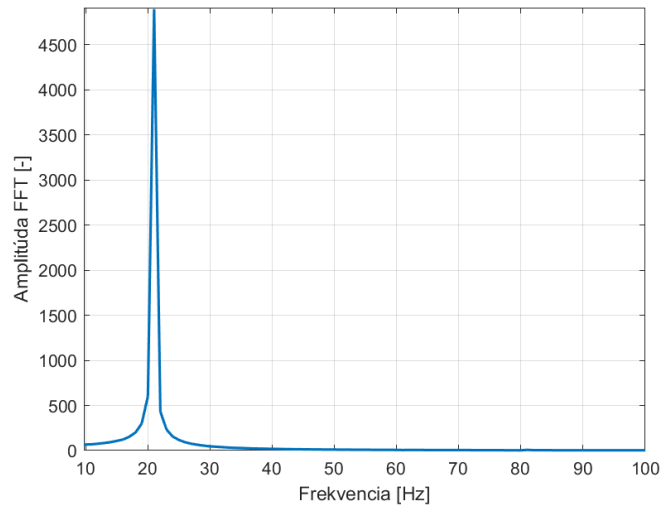
Opäť si odčítame hodnoty zrýchlenia a následne použitím logaritmického dekrementu dopyčítame pomerný útlm sústavy. Po dosadení hodnôt zrýchlenia do vzorca (7.7) dostávame:

$$\xi = \frac{1}{2\pi 5} \ln \left(\frac{2,5639}{1,9636} \right) = 0,0085 \text{ [-]} \quad (7.7)$$

Pomocou pomerného útlmu ξ si opäť vypočítame faktor kvality Q:

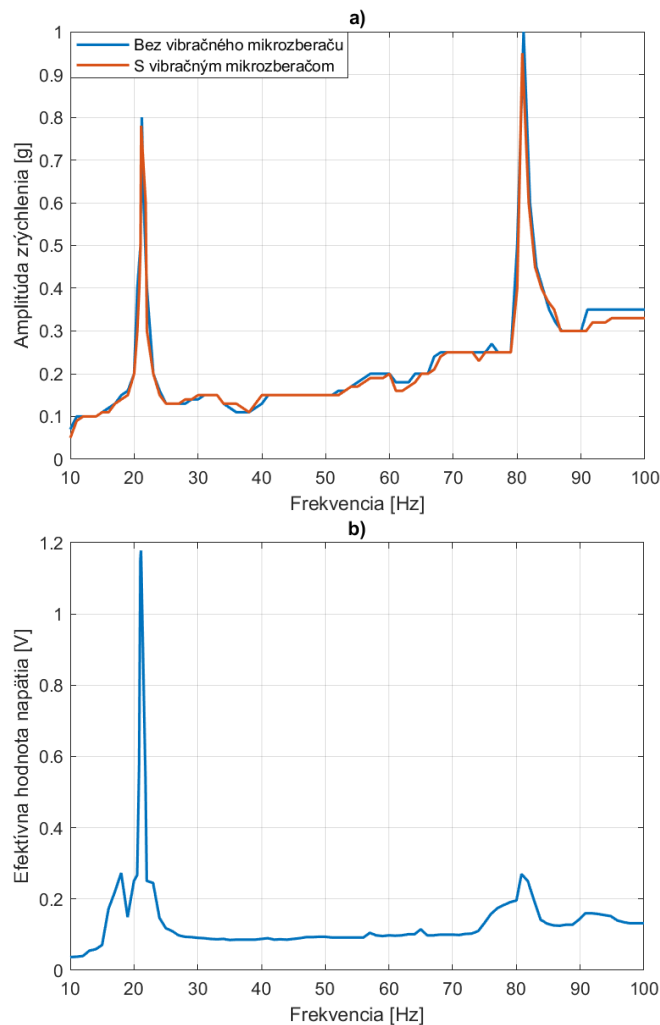
$$Q = \frac{1}{2 \cdot \xi} = \frac{1}{2 \cdot 0,0085} = 58,8 \text{ [-]} \quad (7.8)$$

Skrátením nosníku sa nám zvýšila hodnota pomerného útlmu a znížila sa veľkosť faktoru kvality. To znamená, že sa zvýšilo tlmenie a systém sa ustáli v rýchlejšom čase. Opäť sme si do grafu vykreslili obálku. Na obrázku 7.8, môžeme vidieť, že obálka presne odpovedá amplitúdam zrýchlenia, čo nám potvrdzuje, že náš výpočet je správny. Ďalej sme opäť previedli signál z časovej oblasti do frekvenčnej pomocou FFT. Rovnako ako v predchádzajúcom meraní sa nám podarilo systém vybudit' na prvú vlastnú frekvenciu a iné frekvencie sa už v odozve nevyskytovali. Z obrázku 7.9 môžeme odčítať hodnotu vlastnej frekvencie 21 Hz.



Obr. 7.9. Frekvenčné spektrum vybudenej sústavy

Následne sme sa opäť presunuli k meraniu amplitudo-frekvenčnej charakteristiky. Keďže sme si v predchádzajúcom meraní dokázali, že priebehy rastúcej a klesajúcej frekvencie sú rovnaké, teraz vykonáme meranie iba pre rastúcu frekvenciu. Premerali sme si náš pracovný rozsah, najprv bez vibračného mikrozbierača a následne s ním.



Obr. 7.10. a) Vplyv mikrozbierača na správanie sústavy
b) Generované napätie mikrozbieračom

Na obrázku 7.10. a), môžeme vidieť rovnako ako v predchádzajúcom prípade, že pridaním mikrozbierača sa správanie systému nijak razantne nezmenilo. Došlo k minimálnemu zníženiu amplitúdy zrýchlenia a hodnoty vlastných frekvencií. V našom rozsahu sa vyskytujú dve vlastné frekvencie (prvá a tretia). Keďže sa tentokrát druhá vlastná frekvencia neobjavila znamená to, že v tomto meraní sme nastavili nevyváhu presne do ťažiska sústavy a teda nevznikla asymetria.

Bez vibračného mikrozbierača		S vibračným mikrozbieračom	
Vlastná frekvencia [Hz]	Dosiahnuté zrýchlenie [g]	Vlastná frekvencia [Hz]	Dosiahnuté zrýchlenie [g]
21,2	0,8	21	0,78
81	1	80,8	0,95

Tabuľka 11 – Dosiahnuté zrýchlenia

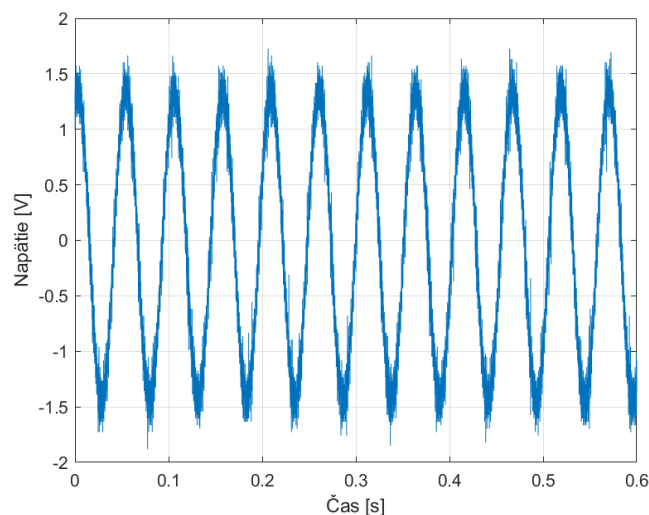
Z týchto hodnôt môžeme vypočítať amplitúdu výchylky. Maximálna výchylka bude vypočítaná pomocou vzorca:

$$Y = \frac{a}{\omega} = \frac{a}{2\pi f^2} = \frac{0,8 \cdot 9,81}{(2 \cdot 3,14 \cdot 21,2)^2} = 0,442 \text{ mm} \quad (7.9)$$

Ukázalo sa, že skrátením nosníku sa nám znížila maximálna výchylka.

Na obrázku 7.10. b), vidíme tri maximá, prvé maximum (18 Hz) predstavuje vlastnú frekvenciu mikrozbierača a hodnota generovaného napätia je 0,27 V. Maximálna hodnota generovaného napätia je 1,18 V pri prvej vlastnej frekvencii sústavy 21 Hz. Pri tretej vlastnej frekvencii sústavy 80,8 Hz predstavuje hodnota generovaného napätia 0,27 V.

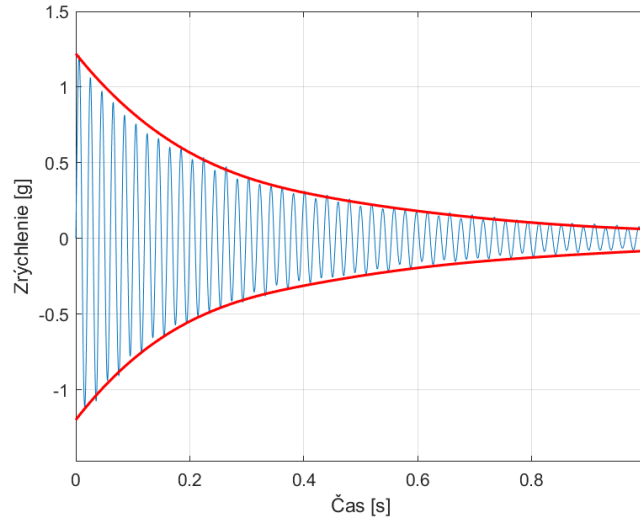
Na záver merania sme si vykreslili priebeh generovaného napätia. Z grafu vidíme, že amplitúda generovaného napätia je 1,67 V.



Obrázok 7.11. Priebeh maximálneho generovaného napätia mikrozbieračom

7.3 Meranie zariadenia s dĺžkou 0,6 m

Opäť sme si skrátili nosník. Tentokrát na 60 cm a opäť sa pozrieme na správanie sústavy. Dá sa predpokladať, že ďalším skrátením nosníku sa nám opäť zvýši vlastná frekvencia a pomerný útlm. Keďže sme výrazne skrátili nosník ale nastavenie nevyvah ostalo rovnaké dá sa očakávať, že sa to prejaví na vzraste amplitúdy zrýchlenia. Rovnako ako pri prvom meraní si najprv zmeriame odozvu systému po vybudení.



Obr. 7.12. Odozva sústavy na vybudenie

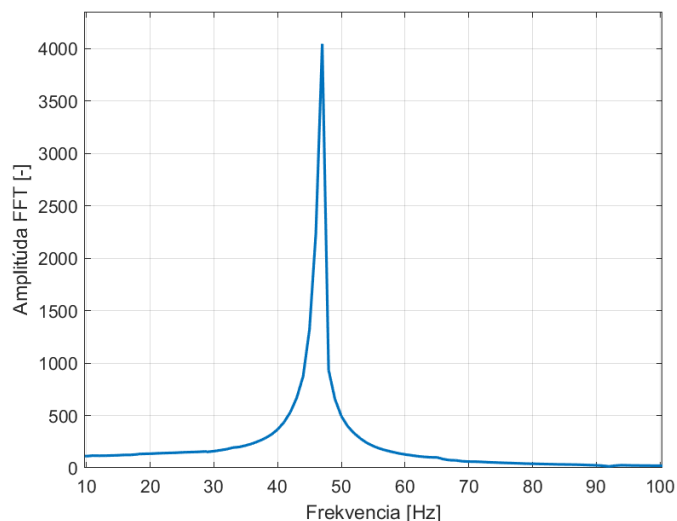
Následne odčítame hodnoty zrýchlenia a použitím logaritmickeho dekrementu dopočítame pomerný útlm sústavy. Po dosadení hodnôt zrýchlenia do vzorca (6.1.) dostávame:

$$\xi = \frac{1}{2\pi 5} \ln \left(\frac{1,0642}{0,6898} \right) = 0,0138 [-] \quad (7.10.)$$

Vypočítame faktor kvality Q:

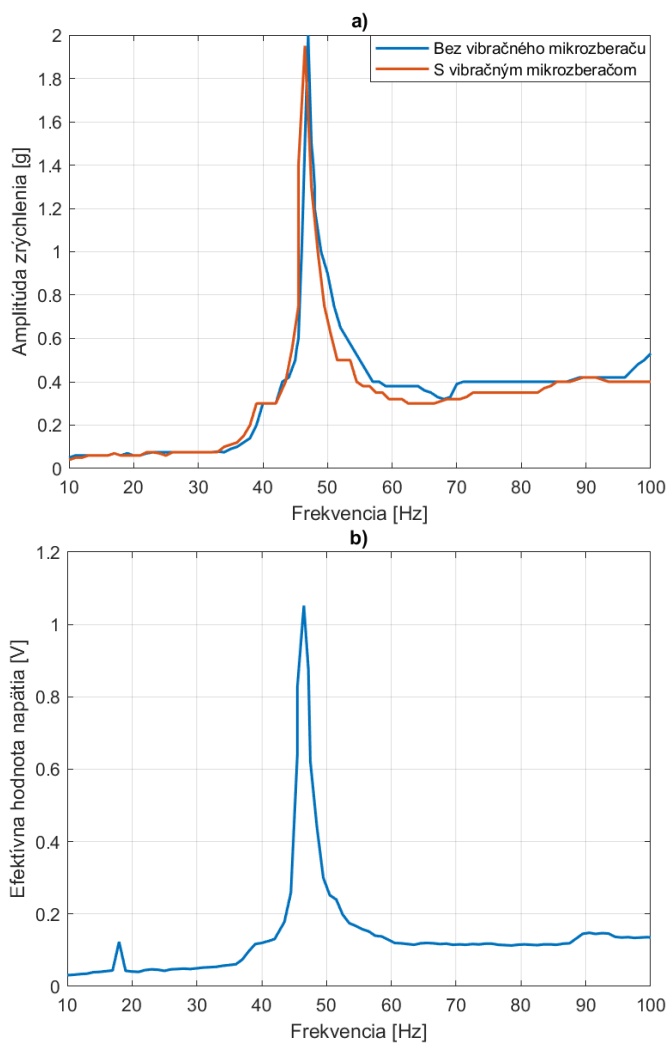
$$Q = \frac{1}{2 \cdot \xi} = \frac{1}{2 \cdot 0,0138} = 36,2 [-] \quad (7.11.)$$

Opätovným skrátením nosníku sa nám opäť zvýšila hodnota pomerného útlmu a znížil sa faktor kvality. To znamená, že systém sa ustáli v ešte kratšom čase. Do grafu sme si opäť vykreslili obálku. Môžeme vidieť malé odchýlky amplitúd a obálky. To môže byť spôsobené slabou nelinearitou systému ale taktiež vplyvom drobných okolitých vibrácií. Následne sme opäť signál previedli do frekvenčnej oblasti (obr. 7.13.). V sledovanom spektre sa objavila prvá vlastná frekvencia 47 Hz.



Obr. 7.13. Frekvenčné spektrum vybudenej sústavy

Opäť sme premerali amplitudo-frekvenčnú charakteristiku bez vibračného mikrozberača a s ním (obr. 7.14. a)). Pri meraní s vibračným mikrozberačom sme si zaznamenávali veľkosť generovaného napätia (obr. 7.14. b)).



Obr. 7.14. a) Vplyv mikrozberača na správanie sústavy
b) Generované napätie mikrozberačom

Na obrázku 7.14. a) vidíme, že rovnako ako v predchádzajúcom prípade pridanie mikrozbierača jemne zníži amplitúdy zrýchlenia a hodnotu vlastnej frekvencie. V našom rozsahu sa vyskytuje už len jedna vlastná frekvencia. Z grafu je vidieť nárast amplitúdy zrýchlenia, presne ako sme očakávali. Keďže sme chceli, čo najlepšie popísať správanie sústavy pri skraccovaní nosníku, nemenili sme nastavenie nevývah. Dosažené hodnoty zrýchlenia, sú už mimo požadovaný limit zadania, a však znížením hmotnosti nevývah by sme boli schopní dosiahnuť požadovaný limit.

Bez vibračného mikrozbierača		S vibračným mikrozbieračom	
Vlastná frekvencia [Hz]	Dosažené zrýchlenie [g]	Vlastná frekvencia [Hz]	Dosažené zrýchlenie [g]
47	2	46,5	1,94

Tabuľka 12 – Dosažené zrýchlenia

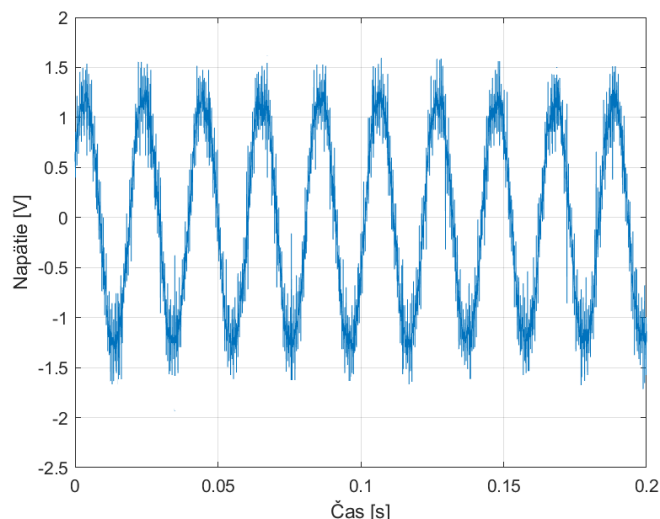
Z týchto hodnôt môžeme vypočítať amplitúdu výchylky. Maximálna výchylka bude vypočítaná pomocou vzorca:

$$Y = \frac{a}{\omega} = \frac{a}{2\pi f^2} = \frac{2 \cdot 9,81}{(2 \cdot 3,14 \cdot 47)^2} = 0,225 \text{ mm} \quad (7.12.)$$

Skrátením nosníku sa nám opäť znížila maximálna výchylka.

Na obrázku 7.14. b) vidíme dve maximá, prvé maximum (18 Hz) predstavuje vlastnú frekvenciu mikrozbierača a hodnota generovaného napätia je 0,12 V. Pri vlastnej frekvencii sústavy 46,5 Hz je hodnota generovaného napätia je 1,07 V.

Na záver merania sme si vykreslili priebeh generovaného napätia. Z grafu vidíme, že amplitúda generovaného napätia je 1,52 V.



Obrázok 7.15. Priebeh maximálneho generovaného napätia mikrozbieračom

7.4 Zhodnotenie merania

Meranie sme vykonali pre tri rôzne dĺžky nosníku. Z meraní nám vyšlo, že skrátenie nosníku zvýši hodnotu pomerného útlmu a zníži hodnotu faktoru kvality. Rovnako tak zníži amplitúdu výchylky. Pri meraní s vibračným mikrozbieračom dochádzalo iba jemnému zníženiu amplitúdy zrýchlenia a nepatrnému posunutiu vlastnej frekvencie. Čo svedčí o tvrdosti systému. Vlastná frekvencia pridaného mikrozbierača predstavovala 18 Hz.

V prvom meraní sme si nastavili dĺžku nosníku na jeden meter. Ako prvé sme si zmerali odozvu sústavy na vybudenie. Z toho sme si dokázali vypočítať pomerný útlm a faktor kvality. Časový priebeh odozvy sme previedli pomocou FFT do frekvenčnej oblasti a odčítali hodnotu prvej vlastnej frekvencie. Neobjavili sa žiadne sekundárne frekvencie, ani vyššie vlastné frekvencie. To môže znamenať, že sme systém vybudili iba na prvú vlastnú frekvenciu. Ďalej sme prešli k meraniu A-F charakteristiky pre rastúcu frekvenciu a klesajúcu frekvenciu. Zistili sme že tieto priebehy sú totožné. Môžeme pozorovať iba drobné odchýlky, ktoré môžu byť spôsobené ľudským faktorom a nepresným odčítaním hodnôt zrýchlenia. Toto správanie svedčí o tom, že systém je lineárny. Maximálne dosiahnuté zrýchlenie predstavuje 1g, čo bola jedna podmienka zadania. V grafe môžeme vidieť, že sa objavili prvé tri vlastné frekvencie. Ak je nevyváha presne v ťažisku sústavy druhá vlastná frekvencia by sa nemala objaviť. Keďže sa v tomto prípade objavila, dá sa predpokladať, že nevyváha sa nenachádzala presne v ťažisku sústavy a tým vznikla asymetria, ktorá spôsobila objavenie druhej vlastnej frekvencie. Následne sme prešli k meraniu s vibračným mikrozberačom. Vieme, že vlastná frekvencia mikrozberača je 18 Hz a vlastná frekvencia našej sústavy je tak isto 18 Hz. Očakávame, že dosiahneme maximálne generované napätie. Čo sa všetkými tromi meraniami potvrdilo, keďže hodnota generovaného efektívneho napätia bola 1,48 V.

Následne sme nosník skrátili na 90 cm. To malo za následok zvýšenie hodnoty pomerného útlmu a zníženie faktoru kvality a amplitúdy výchylky. Opäť sme previedli signál do frekvenčnej oblasti a odčítali hodnotu vlastnej frekvencie 21 Hz, opäť sa nevyskytli žiadne sekundárne frekvencie. Následne sme rovnako ako v prvom meraní zmerali A-F charakteristiku. Pričom správanie sústavy bolo rovnaké ako pri prvom meraní. A však tentokrát sa už neobjavila druhá vlastná frekvencia. To znamená, že tentokrát sme systém nastavili tak, že nevyváha sa nachádzala presne v ťažisku sústavy a teda nevznikla žiadna asymetria. Ďalej sme si zmerali závislosť efektívnej hodnoty generovaného napätia mikrozberačom na frekvencii. V grafe je možné pozorovať tri vrcholy. Prvý predstavuje vlastnú frekvenciu mikrozberača a ďalšie dva predstavujú vlastné frekvencie budiacej sústavy. Maximálna hodnota generovaného efektívneho napätia bola pri vlastnej frekvencii 21 Hz a dosahovala hodnotu 1,18 V.

Ako posledné sme meranie vykonali pre nosník s dĺžkou 60 cm. Opäť správanie sústavy bolo rovnaké ako v predchádzajúcich meraniach. V A-F charakteristike sa objavila už iba jedná vlastná frekvencia 47 Hz. Keďže sme skracovali nosník ale nastavenie nevyváh ostalo rovnaké dá sa očakávať, že takéto výrazne skrátenie sa prejaví na vzraste amplitúdy zrýchlenia. Čo sa aj potvrdilo, keďže dosiahnutá amplitúda zrýchlenia je 2g respektíve 1,95g pre meranie s mikrozberačom. Keďže sme chceli, čo najlepšie popísať správanie sústavy pri skracovaní nosníku, nemenili sme nastavenie nevyváh. Dosiahnuté hodnoty zrýchlenia, sú už mimo požadovaný limit zadania, a však znížením hmotnosti alebo excentricity nevyváh by sme boli schopní dosiahnuť požadovaný limit. V závislosti efektívnej hodnoty generovaného napätia mikrozberačom na frekvencii je možné pozorovať už len dva vrcholy. Prvý predstavuje vlastnú frekvenciu mikrozberača a ďalší predstavuje vlastnú frekvenciu budiacej sústavy. Maximálna hodnota generovaného efektívneho napätia dosahovala pri vlastnej frekvencii sústavy 46,5 Hz hodnotu 1,07 V.

8 ZÁVER

Hlavným cieľom práce bol návrh experimentálnej sústavy s budením nevývahou. Využitie tejto sústavy bude hlavne na generovanie vibrácií pre vibračný mikrozberač. Práve potreba budenia vibračných mikrozberačov bola hlavnou motiváciou k vyrobeniu experimentálnej sústavy.

Ako prvé bolo nutné vykonať rešerš budičov vibrácií. Rešerš práce pozostávala popisu budičov vibrácií. Budiče vibrácií sa delia na tri základné skupiny a teda lineárne, rotačné a kombinované. Následne sa ešte delia podľa spôsobu využívaného fyzikálneho princípu. Pri každom fyzikálnom sme popísali princíp fungovania, typické použitie v praxi, výhody a nevýhody. Detailnejší popis mechanického budiča s nevývahou bol uvedený v kapitole 3. Keďže práve tento typ budiča bol neskôr v práci navrhnutý a vyrobený.

Následne sme prešli k návrhu konštrukcie stola. Pri návrhu konštrukcie sme vychádzali z požadovaných parametrov ako maximálna dĺžka nosníku a vlastná frekvencia sústavy. Zároveň bola uvedená požiadavka meniť vlastnú frekvenciu sústavy pomocou zmeny dĺžky nosníku. Všetky tieto požiadavky boli zahrnuté pri návrhu sústavy. Najvhodnejšie uloženie predstavoval obojstranne votknutý nosník. Pre toto uloženie bol vykonaný výpočet a bolo zistené, že najviac vyhovuje nosník s rozmermi 80x6 mm. Pre tento rozmer vychádzala prvá vlastná frekvencia 25,7 Hz. V tomto prípade bola splnená požiadavka na hodnotu prvej vlastnej frekvencie, ktorá vychádzala z vlastných frekvencií dostupných vibračných mikrozberačov. Ďalej sme sa presunuli k návrhu zvyšnej konštrukcie stolu. Požiadavka na zmenu dĺžky nosníku bola vyriešená tak, že budenie je umiestnené v strede nosníku a konštrukcia umožňuje rovnomerne posúvať podpory k sebe. Taktiež je požadované aby v strede nosníku bola plocha, na ktorú bude možnosť pripevniť akcelerometer alebo vibračný mikrozberač. To bolo vyriešené pridaním montážnej podložky do stredu nosníka. V ďalšej kapitole bol vykonaný numerický výpočet v programe Ansys. Bolo zistené, že pridaná hmotnosť výrazne zníži hodnoty vlastných frekvencií.

Ďalšia časť práce sa zaoberala navrhnutím budenia sústavy. Rozhodli sme sa vychádzať z konštrukcie vibračného motora. Ten ma na každej strane hriadeľa umiestnené nevývahy. Rotácia týchto nevývah vytvára vibrácie. Ako prvé bolo potrebné vybrať motor. Keďže je potrebné presné nastavenie frekvencie kmitania, motor musí obsahovať enkodér. Enkodér bude poskytovať informáciu o aktuálnych otáčkach. Zo zadania je zrejmé, že požadovaná frekvencia kmitania je 100 Hz. Práve z tohto parametru vychádzal výber motora. Zvolený motor dosahoval väčšie otáčky, ako je požadované. Preto bolo nutné navrhnuť prevod. Následne bol vykonaný návrh uchytania motora ku konštrukcii pomocou motorovej objímky. Hriadeľ je uložený v ložiskových jednotkách a na oboch koncoch hriadeľa je pripevnená nevývaha. Nevývaha je konštruovaná ako kruhový disk, ktorý ma po obvode rozmiestnené diery so závitom. Do dier je možnosť našraubovať skrutky alebo nastavovacie skrutky a tým vytvoriť nevývahu. Veľkosť nevývahy je možné regulovať buď hmotnosťou skrutky alebo veľkosťou jej zaskrutkovania.

V ďalšej časti práce bolo potrebné navrhnuť ovládaciu časť budiča. Je žiadané aby obsluha dokázala jednoducho nastaviť požadovanú frekvenciu vibrácií. K tomu budú slúžiť ovládacie prvky ako tlačidlá a potenciometre. Zároveň aby mala obsluha informáciu o nastavených hodnotách frekvencie je použitý LCD displej. Všetky tieto prvky sú pripojené k mikrokontroleru Arduino UNO, ktoré na základe nich prevádza výpočty a následne ovláda motor pomocou motorového ovládaču. Ten slúži na riadenie otáčok a smeru otáčania motora.

Ďalej sme navrhli program. Program predstavuje jadro celého riadiaceho obvodu. Zohráva kľúčovú úlohu pri riadení rýchlosti motora. Jeho úlohou je spracovávať vstupné signály z enkodéru a ovládacích prvkov. Následne riadiť výstupné signály pre motor, tak aby dosiahol požadované otáčky. V ďalšej časti práce je popísané fungovanie programu, použité knižnice a funkcie, pomocou ktorých program riadi celý budič.

Ďalšia kapitola sa venuje výrobe zariadenia. Obsahuje krátky popis konštrukcie vibračného zariadenia a budiča. V tento moment ostávalo navrhnuť ovládaciu krabičku, rozmery a otvory krabičky boli navrhnuté na základe presných rozmerov použitých komponent. Výroba krabičky prebehla pomocou 3D tlače. Po vyrobení krabičky bolo nutné osadiť jednotlivé ovládacie prvky a popísať ich funkciu.

Ako posledné nasledovalo testovanie a validácia vyrobeného zariadenia. Najprv boli popísané jednotlivé zariadenia, ktoré budú slúžiť k meraniu a ich umiestnenie na sústave. Meranie sme vykonali pre tri rôzne dĺžky nosníku. V každom meraní je jasne vidieť, že čím bližšie je vlastná frekvencia sústavy k vlastnej frekvencii mikrozberču, tým je väčšie generované napätie mikrozberačom. Taktiež môžeme pozorovať že mikrozberač nemá na správanie sústavy žiaden výrazný vplyv.

Všetky ciele práce boli splnené. Sústava funguje a je možné ju použiť ako zdroj vibrácií pre vibračné mikrozberače. Na záver treba spomenúť, že pri meraní v okolí vlastnej frekvencie sústavy dochádzalo k miernemu kolísaniu otáčok motora. Túto situáciu sme sa snažili vyriešiť jemným doladením regulátoru a však ani to nepomohlo. Následne bol vykonaný pokus, pri ktorom sa systém nechal uregulovať a nastavila sa hodnota konštantnej striedy, s cieľom zabrániť kolísaniu otáčok a dosiahnuť konštantné otáčky motora. Bohužiaľ, ani táto metóda nepomohla dosiahnuť požadovaný efekt. V budúcnosti na vylepšenie práce a vyriešenie tohto problému by bolo možné zvážiť použitie silnejšieho motora, čo by mohlo pomôcť vyriešiť tento problém.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] LALANNE, Christian. Mechanical vibration and shock analysis, sinusoidal vibration. John Wiley & Sons, 2014.
- [2] What Do You Mean, Environmental Test... and “Don’t Stack Your Resonances”? [online]. 2013 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://incompliancemag.com/article/what-do-you-mean-environmental-test-and-dont-stack-your-resonances/>
- [3] STROJE NA BETON [online]. 2021 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <http://www.strojenabeton.sk/--6-57-vibracny-stol-150>
- [4] TEARDOWN XBOX 360 CONTROLLER [online]. 2018 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/maker/projects/teardown-xbox-360-usb-controller/8a96242e298b4008a1534cc835531fbe>
- [5] Anekar, Nitinkumar. (2014). DESIGN AND TESTING OF UNBALANCED MASS MECHANICAL VIBRATION EXCITER. International Journal of Research in Engineering and Technology. 03. 107-112. 10.15623/ijret.2014.0308017.
- [6] Electrodynamic Shaker System for Shock and Vibration Testing [online]. 2018 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.wewontech.com/electrodynamic-shaker/>
- [7] Electromagnetic shakers operating guide [online]. 2018 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://wilcoxon.com/wp-content/uploads/2016/07/Electromagnetic-Shaker-Operation-Manual-91220D.pdf>
- [8] Basic of vibration testing and technology [online]. 2017 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.tira-gmbh.de/en/vibration-test-systems/basics/>
- [9] Dualshaker vibration control [online]. 2018 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.crystallinstruments.com/blog/2018/9/27/dual-shaker-vibration-control>
- [10] DE SILVA, Clarence W. (ed.). Vibration and shock handbook. CRC press, 2005.
- [11] What Is a Hydraulic Vibration Shaker Used For? [online]. 2021 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.ascend-tech.com/blog/what-is-a-hydraulic-vibration-shaker-used-for>
- [12] Global External Hydraulic Vibrators [online]. 2022 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.globalmanufacturing.com/hydraulic-vibrators/>
- [13] MAST systems [online]. 2018 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/sites/default/files/obsah/produkt/264/soubory/mast.pdf>
- [14] Development and Parametric Analysis of Vibration System Controlled by Hydraulic Shock Rotary Vibrator [online]. 2021 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2021/1082963>
- [15] Pneumatic Vibrators [online]. 2020 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.nettervibration.com/en/pneumatic-vibrators>
- [16] VEBAC VIBRO [online]. 2012 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.webac-vibro.com/pneumaticke-vibromotory/>
- [17] Airmatic pneumatic sieve shaker [online]. 2017 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://filtra.com/en/airmatic-pneumatic-sieve-shaker/>
- [18] Pneumatic paint shaker [online]. 2015 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.qualtechproductsindustry.com/products/stir-dispersion-milling/pneumatic-paint-shaker/>

- [19] MCCONNELL, Kenneth G. Vibration testing: theory and practice. New York: John Wiley, 1995, 606 s. ISBN 0-471-30435-2.
- [20] Vibrating tables [online]. 2018 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <http://www.vibco.com/products/vibrating-tables>
- [21] INDUSTRIAL VIBRATORS [online]. 2018 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://elektropohony.sk/wp-content/uploads/2018/09/PDF-Download-Vibra%C4%8Dn%C3%A9-elektromotory.pdf>
- [22] FRIEDRICH SCHWINGTECHNIK – MANUAL VIBRATION MOTORS [online]. 2019 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.friedrich-schwingtechnik.de/assets/downloads/friedrich_manual_vibration_motors_F_sk.pdf
- [23] VALÁŠEK, M. and BAUMA, V., a Šika Z. Mechanika B. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. [cit. 2023-03-14]
- [24] IRVINE T., BENDING FREQUENCIES OF BEAMS, RODS, AND PIPES [online]. 2012 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.vibrationdata.com/tutorials2/beam.pdf>
- [25] 24V DC MOTOR 775 [online]. 2018 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/4000442030710.html>
- [26] KP08 upínacie ložisko [online]. 2015 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/122932-kp08-upinaci-lozisko-8mm-stojate.html?gclid=Cj0KCQjwz6ShBhCMARIsAH9A0qWJmtuwzQgCKNdFdtaVPySYgYKzC211nivnGtRARZgaCAjU43l0cR4aAro6EALw_wcB
- [27] Hodnoty mezi pevnosti, klzu, únavy a dovolených napětí pro ocel [online]. 2013 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hodnoty-mezi-pevnosti-kluzu-unavy-a-dovolenych-napeti-pro-ocel>
- [28] Mechanika II [online]. 2009 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/MECH_II/Mechanika_II_vyukovy_manual_na_SSPU_Opava.pdf?fbclid=IwAR2pZQAcFjATE6PQ_TkyqGMGe17m-MKqMwCzjZJhj2b6N-KeU61Z-QCJ-jA
- [29] TB67H420FTG DUAL/SINGLE MOTOR DRIVER CARRIER [online]. 2018 [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2999>
- [30] ARDUINO UNO REV3 [online]. 2010 [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>
- [31] LCD DISPLEJ [online]. 2013 [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: <https://navody.dratek.cz/zaciname-s-arduinem/lcd-displej.html>

ZOZNAM TABULIEK A OBRÁZKOV

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 – Korene frekvenčnej rovnice	29
Tabuľka 2 – Vypočítaná vlastná frekvencia nosníku s dĺžkou 1m.....	29
Tabuľka 3 – Výsledky modálnej analýzy	33
Tabuľka 4 – Požadované parametre	35
Tabuľka 5 – Parametre motoru	37
Tabuľka 6 – Použité komponenty na konštrukciu stola	50
Tabuľka 7 – Použité komponenty na konštrukciu vibračného budiča	51
Tabuľka 8 – Použité komponenty riadenia.....	52
Tabuľka 9 – Použité ovládacie prvky a ich funkcia	54
Tabuľka 10 – Dosiahnuté zrýchlenia.....	58
Tabuľka 11 – Dosiahnuté zrýchlenia.....	62
Tabuľka 12 – Dosiahnuté zrýchlenia.....	65

Zoznam obrázkov

Obr. 2.1. Typické použitie budičov vibrácii	11
Obr. 2.2. Konštrukcia elektrodynamického budiča	13
Obr. 2.3. Využitie elektrodynamického budiču v praxi	14
Obr. 2.4. Využitie hydraulického budiču v praxi	15
Obr. 2.5. Konštrukcia lineárneho hydraulického budiču.....	16
Obr. 2.6. Konštrukcia rotačného hydraulického budiču	16
Obr. 2.7. Využitie pneumatického budiču v praxi.....	17
Obr. 2.8. Lineárny pneumatický budič	18
Obr. 2.9. Gul'ôčkový vibromotor.....	18
Obr. 2.10. Turbínový vibromotor	19
Obr. 2.11. Využitie mechanického budiču v praxi	20
Obr. 2.12. Budič vibrácii s priamym pohonom	21
Obr. 3.1. Budič vibrácii s rotujúcou nevyváhou.....	22
Obr. 3.2. Konštrukcia vibračného motoru	23
Obr. 3.3. Silový rozbor systému s nevyváženou rotujúcou hmotou.....	24
Obr. 3.4. A-F charakteristika pre kmitanie spôsobené rotáciou nevyváhy.....	25
Obr. 4.1. Nákres sústavy.....	26
Obr. 4.2. Obojstranne votknutý nosník.....	27

Obr. 4.3. Vlastné tvary obojstranne votknutého nosníka	30
Obr. 4.4. Závislosť vlastnej frekvencie na dĺžke nosníka	30
Obr. 4.5. IPE profil 220 s uchýtkami a podstava.....	31
Obr. 4.6. Montážna doska a sťahovacia príložka	31
Obr. 4.7. Výsledný návrh konštrukcie stola	32
Obr. 4.8. Nastavenie okrajovej podmienky	32
Obr. 4.9. Sieť konečných prvkov.....	33
Obr. 4.10. Dosiahnuté výsledky harmonickou analýzou.....	34
Obr. 5.1. Návrh konštrukcie budiča.....	35
Obr. 5.2. Bloková schéma sústavy	36
Obr. 5.3. Rozmery motora	38
Obr. 5.4. Motorová objímka	38
Obr. 5.5. Nevývaha.....	39
Obr. 5.6. Ložisková jednotka KP08	39
Obr. 5.7. Wohlerova krivka	41
Obr. 5.8. Výsledný návrh konštrukcie budiča	42
Obr. 5.9. Bloková schéma sústavy	42
Obr. 5.10. DC motor 775 s enkodérom	43
Obr. 5.11. Popis pinov a zapojenie s jedným motorom.....	44
Obr. 5.12. Arduino UNO	45
Obr. 5.13. Pripojenie displeju k Arduino pomocou obvodu PCF8574.....	45
Obr. 5.14. Bloková schéma programu	46
Obr. 5.15. Určenie smeru otáčania motora pomocou signálu z ekodéra	47
Obr. 5.16. Filtrácia signálu	48
Obr. 5.17. PID regulátor	48
Obr. 5.18. Regulácia systému pri skokovej zmene z 10 Hz na 100 Hz.....	49
Obr. 5.19. Regulácia systému pri skokovej zmene z 100 Hz na 10 Hz.....	49
Obr. 6.1. Konštrukcia stola.....	50
Obr. 6.2. Budič vibrácii	51
Obr. 6.3. Tlač krabičky	53
Obr. 6.4. Pripevnenie riadiacich komponent na zdroj	53
Obr. 6.5. Výsledná ovládacia krabička.....	54
Obr. 7.1. Príprava merania.....	55
Obr. 7.2. Pripevnenie vibračného mikrozberaču na vibračnú sústavu	55
Obr. 7.3. Odozva systému na vybudenie	56

Obr. 7.4. Frekvenčné spektrum vybudenej sústavy.....	57
Obr. 7.5.A-F charakteristika zrýchlenia	57
Obr. 7.6. a) Vplyv mikrozbierača na správanie sústavy b) Generované napätie mikrozbieračom.....	58
Obr. 7.7. Priebeh maximálneho generovaného napätia mikrozbieračom.....	59
Obr. 7.8. Odozva systému na vybudenie	60
Obr. 7.9. Frekvenčné spektrum vybudenej sústavy.....	61
Obr. 7.10. a) Vplyv mikrozbierača na správanie sústavy b) Generované napätie mikrozbieračom.....	61
Obr. 7.11. Priebeh maximálneho generovaného napätia mikrozbieračom.....	62
Obr. 7.12. Odozva systému na vybudenie	63
Obr. 7.13. Frekvenčné spektrum vybudenej sústavy.....	64
Obr. 7.14. a) Vplyv mikrozbierača na správanie sústavy b) Generované napätie mikrozbieračom.....	64
Obr. 7.15. Priebeh maximálneho generovaného napätia mikrozbieračom.....	65