



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**KONSTRUKČNÍ NÁVRH PROTOTYPOVÉ STOLNÍ  
NAVÍJEČKY LINEÁRNÍCH CÍVEK**

DESIGN OF A PROTOTYPE TABLE WINDER FOR LINEAR COILS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Vojtěch Ryza

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Kamil Řehák, Ph.D.

**BRNO 2022**

## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Bc. Vojtěch Ryza**  
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Řehák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22

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:

### **Konstrukční návrh prototypové stolní navíječky lineárních cívek**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

V rámci prototypové dílny je nutné využívat cívky dle specifických požadavků, a proto je nutné vyrábět vlastní cívky dle specifických požadavků. Pro usnadnění výroby je možné využít stolní navíječku. Model navíječky by měl zohledňovat požadavky na průměr drátu 0,07 – 0,4 mm, umístění navíječky na stůl o ploše 1 m<sup>2</sup> či maximální hmotnost 15 kg. Cívky budou mít jádro trubkového typu pro upnutí na trn, kde mezní délka okna jádra cívky je 70 mm a mezní šířka navinuté cívky je 30 mm. Obvyklý rozměr jader se pohybuje v okolí délky okna 20 mm a šířky jádra 5 mm. Návrh by měl zohlednit i možnost regulace rychlosti navíjení, předeptnutí drátu a indikaci počtu navinutých závitů.

#### **Cíle diplomové práce:**

Provedení rešerše  
Kritické zhodnocení současných typů navíječek  
Konstrukční návrh stolní navíječky  
Ověření klíčových uzlů

#### **Seznam doporučené literatury:**

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, CH.R., BUDYNAS, R.G. Konstruování strojních součástí. VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

BUDYNAS, R. G., NISBETT, J. K. Shigley's Mechanical Engineering Design. 10th Edition. McGraw-Hill, 2014. ISBN 978-0073398204

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem prototypové stolní navíječky lineárních cívek. V první části této práce jsou popsány základní vlastnosti cívky a metody jejího navíjení. V následující části byla provedena kritická rešerše dostupných navíječek na trhu na základě, které byl vytvořen samotný koncept navíječky. V práci je detailně popsán postup návrhu samotné navíječky spolu s konstrukčními variantami jednotlivých částí navíječky. Závěrem práce je prezentován dosažený koncept prototypové navíječky. Tato problematika byla řešena pomocí 3D programu SolidWorks a MKP v programu ANSYS Student. Celá práce popisuje jednotlivé kroky pro návrh samotného konceptu prototypové lineární navíječky a konstrukční řešení základních komponent.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

cívka, drát, vinutí, technologie navíjení, lineární navíjení, modální analýza, hliníkový profil, krokový motor

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with the design of a prototype table winder for linear coils. The first part of this work describes the basic properties of the coil and its winding methods. In the following section, a critical search was made of the reels available on the market based on which the reel concept itself was created. The work describes in detail the procedure of the winder design together with the design variants of the individual parts of the winders. At the end of the diploma thesis is presented the needed prototype of the coil winder. This problem was solved by using the 3D program SolidWorks and FEM in the program ANSYS Student. The project describes the individual steps of the design of the concept of a prototype linear winder and the component's design.

## **KEYWORDS**

coil, wire, winding, winding technology, linear winding, modal analysis, aluminium profile, stepper motor

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RYZA, Vojtěch. *Konstrukční návrh prototypové stolní navíječky lineárních cívek* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140210>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Kamil Řehák.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Kamil Řehák, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 19. května 2022

.....

Bc. Vojtěch Ryza

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Kamilu Řehákovi, Ph.D. za jeho čas, věcné připomínky a cenné rady, které mi při psaní poskytl. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a kamarádům za podporu v průběhu celého studia.

# OBSAH

Úvod.....	10
<b>1 Kritická rešerše .....</b>	<b>11</b>
1.1 Cívka .....	11
1.1.1 Cívka jako elektromagnet .....	11
1.1.2 Cívka jako induktor.....	11
1.2 Typy cívek.....	11
1.2.1 Vzduchová cívka.....	11
1.2.2 Cívka se železným jádrem .....	11
1.2.3 Cívka s feritovým jádrem.....	12
1.3 Technologie navíjení cívky .....	12
1.4 Zásady navíjení.....	12
1.4.1 Divoké vinutí.....	13
1.4.2 Spirálové vinutí .....	14
1.4.3 Ortocyklické vinutí .....	14
1.5 Lineární navíjení.....	16
1.6 Toroidní navíjení .....	17
1.7 Ruční Navíjení.....	17
1.8 Kostra cívky .....	18
1.9 Vodiče .....	18
<b>2 Přehled obdobných navíječek .....</b>	<b>19</b>
2.1 Ruční navíječky .....	19
2.2 Polo-automatické navíječky .....	19
2.3 automatické navíječky .....	20
2.4 AEH Series Linear Winding Machine.....	21
2.5 CNC Coil Winder MK5 .....	21
2.6 WH-751 .....	22
2.7 WDTC-01 .....	23
<b>3 Zvolená koncepce .....</b>	<b>26</b>
3.1 Schéma konceptu.....	26
3.2 Koncept navržené navíječky .....	27
3.3 Hliníkové profily .....	28
3.4 Bočnice.....	28
3.4.1 Slitina hliníku 6061 .....	29
3.4.2 Další uvažované varianty .....	29
3.5 Konzole uchycení rotační části.....	30
3.6 Uchycení kostry cívky .....	31
3.7 Posuvný naváděcí systém drátu.....	32
3.8 Předpnutí drátu .....	33
3.9 Odvíjecí systém navíječky.....	36
3.10 Krokový motor.....	37
3.10.1 Hybridní motor.....	37
3.11 Trapézový šroub .....	39



<b>4</b>	<b>Kontrola kritických uzlů.....</b>	<b>40</b>
4.1	Vlastní frekvence .....	40
4.2	Budící frekvence .....	41
4.3	Modální analýza.....	41
4.3.1	Příprava modální analýzy trapézové tyče .....	42
4.3.2	Vyhodnocení modální analýzy .....	44
4.4	Harmonická analýza trapézové tyče .....	45
4.4.1	Příprava harmonické analýzy .....	45
4.4.2	Vyhodnocení harmonické analýzy .....	46
4.5	Modální analýza konstrukce navíječky .....	47
4.5.1	Příprava analýzy .....	47
4.5.2	Vyhodnocení analýz .....	50
<b>5</b>	<b>Technické parametry navíječky .....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>Další postup prací .....</b>	<b>53</b>
6.1	Systém Arduino .....	53
6.1.1	Řídící jednotka.....	54
6.2	Opláštění řídicí jednot .....	55
6.3	Bezpečnostní tlačítko .....	55
	<b>Závěr .....</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>63</b>

## ÚVOD

V současnosti existuje celá řada různých typů navíjecích a převíjecích zařízení, které mají různé využití. Mezi jejich hlavní představitele řadíme především navíječky měděných cívek, jejichž primární využití můžeme najít pro výrobu komponent do různých elektrických zařízení. Velká část společností zabývajících se výrobou a vývojem navíječek nabízí celou řadu specifických vlastností a funkcí pro požadovaný typ navíječky.

Ve vývojovém oddělení se zabýváme převážně výrobou a testováním různých prototypů, což mnohdy vede k výrobě malého množství komponent se specifickými vlastnostmi. V našem případě se jedná o výrobu cívek. Nyní ve firmě nemáme žádnou prototypovou navíječku nebo přípravek pro vytvoření malých cívek pro následné testování, a proto veškeré cívky jsou vytvářeny ručně. Výroba těchto prototypových cívek na zakázku je časově a především ekonomicky neefektivní. Při testování mnohdy dochází ke zjištění různých nepřesností a chyb jednotlivých návrhů a je nutné cívky upravit nebo kompletně změnit jejich koncept. Ruční navíjení cívky je poměrně zdlouhavý a neefektivní proces, proto snaha o vytvoření vlastního zařízení rozhodně dává smysl. Existuje celá řada autorizovaných výrobců vyrábějící navíječky na zakázku, ale jejich služby bývají zbytečně drahé vzhledem k našemu využití. Kdyby se jednalo o sériovou výrobu těchto cívek, potom by zakoupení navíječky dávalo smysl. Vzhledem k neustálému vývoji výrobních technologií je nutné být flexibilní. Návrh vlastní navíječky nám dává prostor pro další zdokonalování a upravování, vzhledem k nově vzniklým požadavkům. Sestavení vlastní navíječky bude mít za důsledek zefektivnění přípravné fáze před testováním, získání nezávislosti na dodavatelích zakázkových součástí, značné úspore finančních prostředků a schopnost pružně reagovat na změny v prototypových konceptech.

# 1 KRITICKÁ REŠERŠE

Tato část práce je zaměřena na pojmy, které úzce souvisí jak s navíjením, tak i s jednotlivými navíjecími zařízeními. Hlavním účelem této kapitoly je především vysvětlení pojmů jako je cívka, typy cívek a dále nastínit, jakými způsoby a technologiemi můžeme cívku navíjet. Součástí této kapitoly je také přehled lineárních navíječek, které jsou dostupné na trhu a následné použití získaných poznatků jako předlohu pro návržení naší navíječky.

## 1.1 CÍVKA

Jedná se o elektrotechnickou součástku používanou v elektrických obvodech, kde může sloužit jako elektromagnet nebo jako induktor neboli nositel indukčnosti. Cívka je nejčastěji z měděného drátu, a to proto, aby měla co nejmenší odpor. Samotná indukčnost cívky pak závisí na geometrickém uspořádání, množství závitů a na vnějších i vnitřních vlastnostech prostředí cívky. Samotná cívka dokáže akumulovat energii v magnetickém poli. Cívky mají využití v rozmanitém spektru oblastí, jako například ve stejnosměrných a střídavých obvodech silnoproudé elektrotechniky i slaboproudé elektroniky [4].

### 1.1.1 CÍVKA JAKO ELEKTROMAGNET

Je používána v celé řadě zařízení (elektromotory, elektromagnety, zvonky, reproduktory, a v celé řadě dalších zařízení) kde se využívá magnetická síla magnetického pole kolem cívky v těchto zařízeních [4].

### 1.1.2 CÍVKA JAKO INDUKTOR

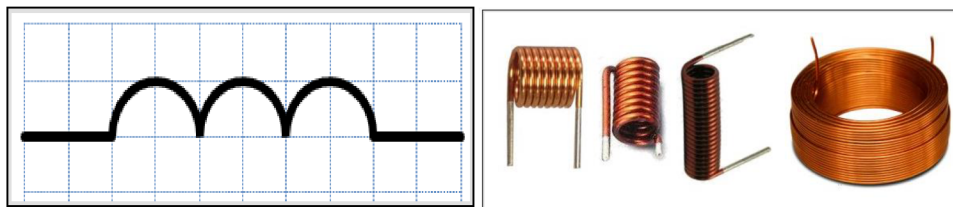
Tato cívka nachází využití v celé řadě zařízení (indukční cívky u spalovacích motorů, dynamické mikrofony, tlumivky, transformátory a další), kde využívá elektrické napětí indukované proměnným magnetickým polem kolem cívky v zařízeních [4].

## 1.2 TYPY CÍVEK

V současnosti existuje široká škála typů cívek. Řadí se mezi ně vzduchová cívka, cívka se železným jádrem, cívka s feritovým jádrem [4].

### 1.2.1 VZDUCHOVÁ CÍVKA

Tato cívka je nejčastěji válcová a disponuje jednou vrstvou nebo více vrstvami. Vzduchová cívka může být samonosná nebo navinutá na nosné kostře a její využití je především v oscilačních obvodech, reproduktorech, reproduktorových pásmových filtrech, a podobně.

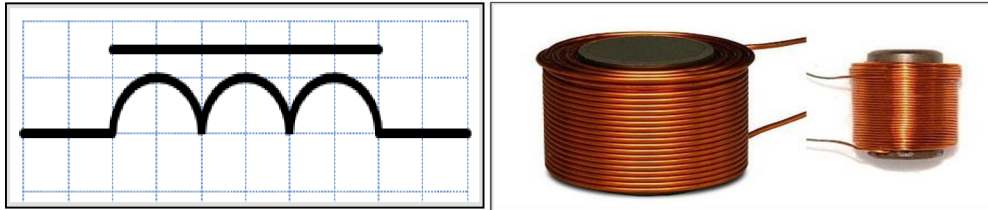


Obr. 1 Schéma vzduchové cívky a jejich reálná podoba [4]

### 1.2.2 CÍVKA SE ŽELEZNÝM JÁDREM

U stejnosměrných obvodů je často použito plné jádro z magneticky měkkého železa, zatímco u střídavých obvodů se jádro skládá ze vzájemně odizolovaných plechů. Důvodem je snaha o

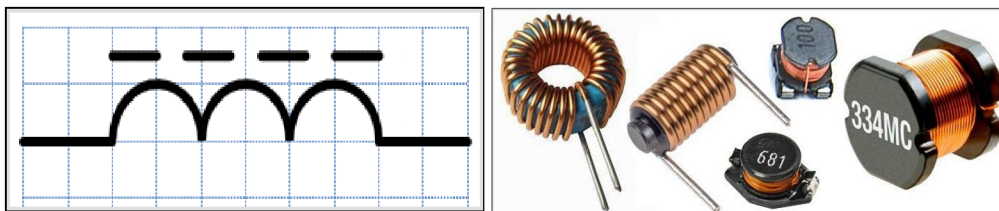
omezení ztráty vířivými proudy. Nejčastěji se používá k zajištění lineárního mechanického pohybu ve stykačích, relé a solenoidech. Mezi další využití můžeme zařadit vytváření rotačních pohybů v motorech, dále vytváření elektrické energie v generátorech, změnu střídavých napětí a proudů v transformátorech, atd [4].



Obr. 2 Schéma cívky s železným jádrem a její reálná podoba [4]

### 1.2.3 CÍVKA S FERITOVÝM JÁDREM

Feritové jádro se používá pro vyšší frekvence, a to především proto, že umožňuje výrobu toroidních i válcových cívek mnohem menších rozměrů, na rozdíl od jader železných. Jejich uplatnění najdeme převážně ve střídavých napájecích zdrojích pro počítačovou techniku a elektroniku, ve filtrech a dalších elektrických zařízeních. Cívky o vysoké frekvenci se vinou z lanka, které se skládá z navzájem odizolovaných tenkých drátků. Hlavním důvodem je omezení skin efektu, kde při vysokých frekvencích dochází k vytlačování elektrického proudu k povrchu vodiče.



Obr. 3 Schéma cívky s feritovým jádrem a její reálná podoba [4]

## 1.3 TECHNOLOGIE NAVÍJENÍ CÍVKY

Cívky se používají jako součást obvodů pro zajištění magnetického pole motorů, generátorů a transformátorů, a také při výrobě reproduktorů a mikrofonů. Samotný tvar a rozměry vinutí jsou navrhovány tak, aby splňovaly specifický účel. Mezi základní parametry vinutí patří indukčnost, faktor Q, izolační pevnost a síla, které mají signifikantní vliv na konstrukci vinutí cívky. Vinutí cívky můžeme z hlediska typu a geometrie rozdělit do několika skupin. Současná výroba probíhá převážně na automatizovaných strojích. [3]

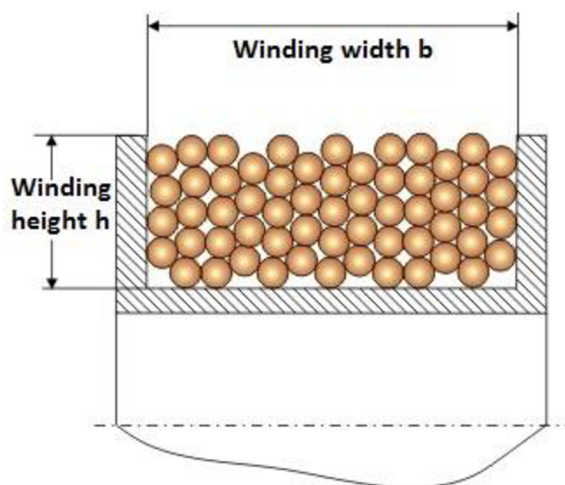
### 1.4 ZÁSADY NAVÍJENÍ

Efektivní cívky minimalizují materiály a objem požadovaný pro daný účel. Poměr plochy elektrických vodičů k poskytnutému prostoru vinutí se nazývá „faktor plnění“. Protože kulaté dráty budou vždy mít určitou mezeru a dráty budou mít také určitý prostor potřebný pro izolaci mezi závitů a mezi vrstvami, je faktor plnění vždy menší než jedna. K dosažení vyšších faktorů plnění lze použít obdélníkový nebo plochý drát. [3]

Faktor plnění lze vypočítat z použití vzorce:

$$F = \frac{d^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot n}{b \cdot h}, \quad (1)$$

kde  $d$  je drátoměr včetně izolace laku,  $n$  znázorňuje počet vinutí a  $b \cdot h$  je průřez těla cívky, který je znázorněn na obrázku 4.



Obr. 4 Průřez těla cívky [3]

Husté vinutí drátů eliminuje vzdušný prostor, z čehož vyplývá, že má vysoký faktor plnění. To zvyšuje účinnost elektrického zařízení a zlepšuje tepelnou vodivost vinutí. Pro nejlepší zabalení kulatých drátů na vícevrstevném vinutí jsou dráty v horní vrstvě v drážkách spodní vrstvy po dobu nejméně 300 stupňů po obvodu cívky. Dráty zabírají hustý obal, který se nazývá „ortocyklické vinutí“. Opakem by byla náhodná drátová struktura v prostoru vinutí, která se nazývá „divoké vinutí“. [3]

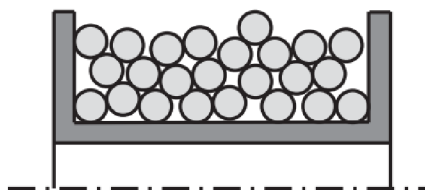
#### 1.4.1 DIVOKÉ VINUTÍ

Tímto způsobem vinutí je dosažen poměrně špatný plnicí faktor. Náhodné rozmístění drátu má za následek širší rozložení celkové délky drátu na těle cívky, jehož důsledkem je širší rozsah odporů elektrické cívky. I přes tyto zjevné nevýhody je tento typ vinutí vysoce využíván. Mezi hlavní přednosti divokého vinutí řadíme především nízké nároky na strojní zařízení, obsluhu a navíjení může probíhat velmi vysokou rychlostí. Tato vinutí jsou většinou používána v cívkách stykačů a relé, zapalovacích cívkách, malých elektrických motorech. Obecně se dá tvrdit, že hlavní využití nacházejí u zařízení s relativně malými měřiči drátu a to do 0,05 mm. Následný plnicí faktor při použití kulatých drátů se pohybuje mezi 73 až 80 %. [3]

Výšku vinutí je možné vypočítat na základě vzorce:

$$h = d^2 \cdot \frac{n}{b}, \quad (2)$$

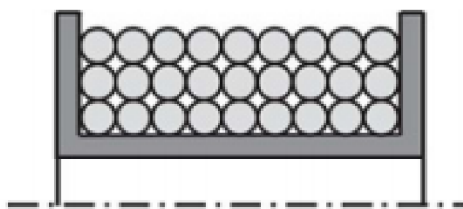
kde  $d$  je drátoměr včetně izolace,  $n$  odpovídá počtu vinutí a  $b$  je šířka vinutí.



Obr. 5 Průřez znázorňující divoké vinutí [2]

#### 1.4.2 SPIRÁLOVÉ VINUTÍ

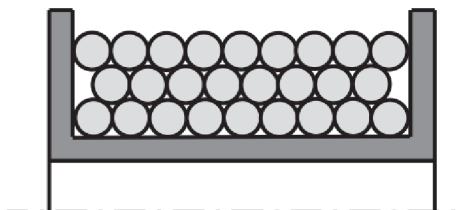
U spirálového vinutí jsou dráty navíjeny spirálovitě v každé vrstvě. Na základě směru pohybu mezi pravou a levou rukou, dochází k protínání drátů v mezeře pod vrstvou



Obr. 6 Průřez znázorňující spirálové vinutí [2]

#### 1.4.3 ORTOCYKICKÉ VINUTÍ

Cílem této zásady je snaha o umístění horní vrstvy vinutí do drážek spodní vrstvy (obrázek 6). Při použití kulatého drátu dosahuje optimální plnicí faktor hodnoty až 90,7 %. Pro nejlepší využití objemu se používá tzv. **krok navíjení**. Pokud tento krok není proveden správně, dochází ke ztrátě samonaváděcí schopnosti drátu a vzniká divoké vinutí.

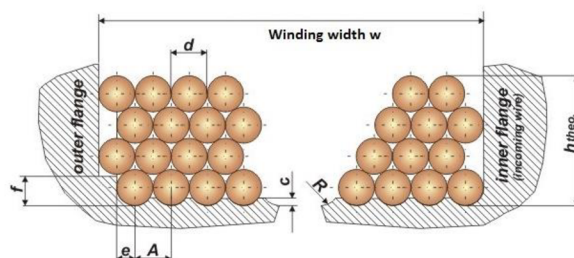


Obr. 7 Průřez znázorňující ortocyklické vinutí [3]

#### Umístění a velikost průřezu:

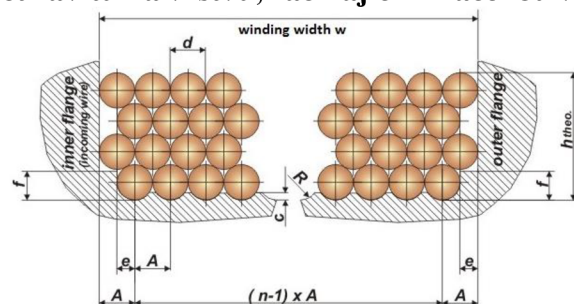
Při navíjení je nutné brát ohled především na délku vinutí jedné vrstvy a na základě této skutečnosti upravit samotný počet závitů a šířku vinutí. Na tuto skutečnost je nutné myslet především u cívek, které nemají kruhový tvar. V takovém případě je nutné umístit přechodovou oblast na navíjecí hlavu, nazývanou také jako malá strana těla cívky. Pro ortocyklické kruhové cívky můžeme definovat tři geometrie vinutí:

## a) Stejný počet závitů na vrstvu



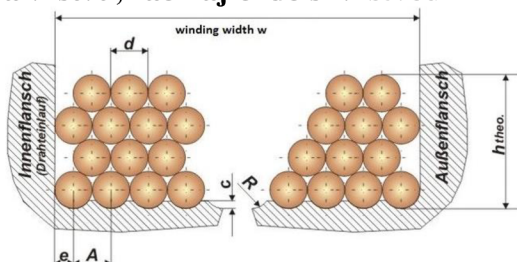
Obr. 8 Průřez znázorňující stejný počet závitů na vrstvu [3]

## b) Nerovnoměrný počet závitů na vrstvu, začínající zkrácenou vrstvou



Obr. 9 Průřez znázorňující stejný počet závitů (zkrácená vrstva) [3]

## c) Nerovný počet tahů na vrstvu, začínající delší vrstvou



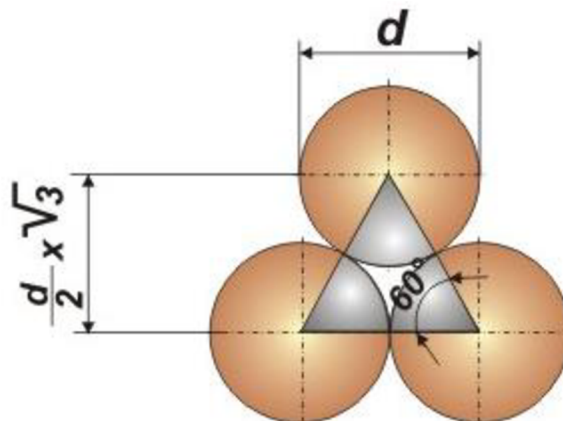
Obr. 10 Průřez znázorňující stejný počet závitů (delší vrstva) [3]

Výběr struktury vinutí primárně závisí na konstrukci nebo tělese cívky. Následně je nutné zvážit dostupné prostorové podmínky pro výšku a šířku vinutí. Díky vhodnému výběru vzoru vinutí je možné ovlivnit konec posledního vinutí a jeho umístění. Samotná výška ortocyklického vinutí cívky je určována následujícím vzorcem:

$$h = [1 + (n - 1) \cdot \sin 60^\circ] \cdot d, \quad (3)$$

kde  $h$  je výška vinutí,  $n$  znázorňuje počet vrstev a  $d$  je maximální měřítka nad lakem.

Tato navíjecí metoda dosahuje nejvyššího faktoru plnění, a tudíž je nejlepší volbou, jak zaplnit daný průřez vinutí kulatými dráty.



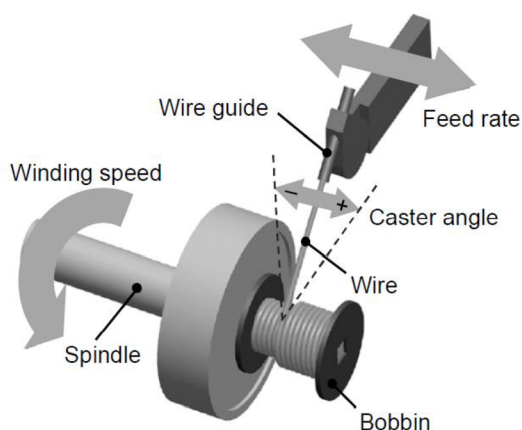
Obr. 11 Průřez správného ortocyklického vinutí [3]

V konečném důsledku jsou požadavky pro ortocyklické vinutí velmi vysoké, což znamená, že jednotlivé tolerance musí být co možná nejnižší. V této souvislosti můžeme orientačně pojmenovat následující hodnoty. Příkladem je tolerance šířky prostoru vinutí  $\Delta b = 0,2 \cdot d$  a tolerance drátu maximální tolerance průměru drátu by neměla být větší než  $\Delta d = 0,4 \cdot \frac{d}{n}$ , což je zhruba polovina tolerance drátu podle německé normy DIN46435. [3]

## 1.5 LINEÁRNÍ NAVÍJENÍ

Základem zařízení pro lineární navíjení je upínací prvek provádějící rotační pohyb kolem své osy, přípravek pro navedení drátu a řídicí jednotka. Následně je na základě požadavků na vyráběnou cívku zvolit vhodné doplňující prvky. Mezi ty stěžejní řadíme naváděcí trn (někdy bývá již pevně připojen k rotační části) a odvíjecí zařízení drátu. Kvůli jednoduché a rychlé výměně navinuté cívky na prázdnou kostru je výhodné použít naváděcí trn tvořený ze dvou částí, kdy druhá část je tvořena posuvným konikem s oporným trnovým protikusem. Odvíječ se používá k nastavení ideální brzdné síly, která udává napínací tah vodiče. Tato část stroje je velmi důležitá, protože nastavený tah drátu přímo ovlivňuje elektrické a mechanické vlastnosti. Při nastavení malé brzdné síly není kladen dostatečný odpor vodiče, což vede k volnému návinnu na kostře. Při nastavení optimální brzdné síly dochází k ideálnímu rozložení a utažení jednotlivých závitů. V případě nastavení příliš velké brzdné síly dochází u vodiče během navíjení ke zúžení průměru. Důsledkem pak je negativní změna vlastností vodiče, popřípadě dochází k jeho přetržení. Rychlost otáčení při lineárním vinutí může dosahovat až  $30000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a rychlost drátu při navíjení dosahuje rychlosti až  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Je nutné zajistit bezpečnost obsluhy, proto bývají rotační části opatřeny ochrannými prvky (plexiskla, kryty). Zásadním faktorem kvalitního návinnu je správná synchronizace osy otáčení a osy pojezdu během navíjení. Synchronizaci zprostředkovává řídicí jednotka, která disponuje jednotlivými navíjecími programy fungujícími na principu smyčky jednotlivých po sobě jdoucích kroků. Při výrobě cívky se bere v potaz její následné použití, což zásadně ovlivňuje kvalitu a cenu vyrobené cívky. [3]

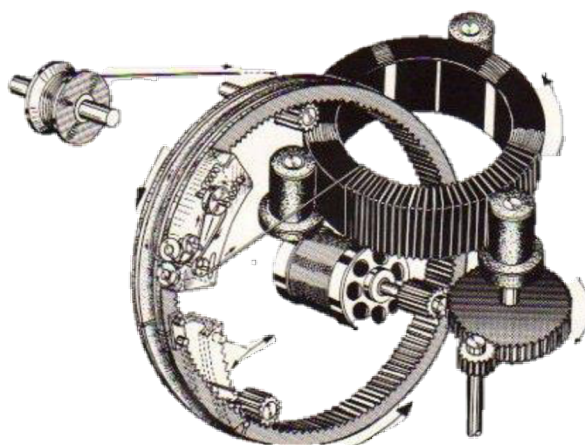




Obr. 12 Schéma procesu lineárního vinutí [4]

## 1.6 TOROIDNÍ NAVÍJENÍ

Při technologii toroidního vinutí jádra se vinutí nebo elektrická cívka vyrábí pomocí navíjení elektrického vodiče (měděný drát) na kruhový prstenec, kdy je vodič rovnoměrně rozložen po obvodu. Před zahájením samotného procesu navíjení je nutné toroidní jádro umístit do přídržného přípravku. Jádro je přidržováno většinou třemi pogumovanými válečky. Orbitální kolo se začne otáčet a namotávat cívku na jádro, které se za pomoci tří pogumovaných aretačních válečků otáčí kolem své osy, což má za důsledek návin cívky (obrázek 13).



Obr. 13 Schéma procesu toroidního navíjení [4]

## 1.7 RUČNÍ NAVÍJENÍ

Tento způsob navíjení bývá nejčastěji používán ve výjimečných případech, kdy například velikost toroidního neodpovídá vybavenosti dílny, nebo jsou na návin kladeny velmi specifické nároky a případné naprogramování navíjecího kódu by bylo složité. Ruční navíjení nese jednu velkou nevýhodu v podobě lidského faktoru, kdy každá manuální operace představuje riziko lidského pochybení. Z praxe mezi nejčastější chyby patří chybný počet závitů a nekvalitní provedení návinnu. Pro předcházení těchto komplikací je nutná požadovaná kvalifikovanost pracovníka.

## 1.8 KOSTRA CÍVKY

Pokud cívka není samonosná, je nutné použít u lineárních cívek kostru cívky. Tato kostra bývá nejčastěji vyráběna jako trubka čtyřhranného nebo kruhového průřezu s vystouplými čely obsahující drážky sloužící k vyvedení navíjeného drátu. Čela kostry cívky disponují různými druhy otvorů, které jsou určeny pro uchycení kostry k rotační části navíječky.

V dřívější době byly kostry vyráběny převážně z pertinaxu, což je izolační a konstrukční materiál hojně využívaný v elektrotechnice. V současnosti jsou tyto kostry vyráběny převážně technologií tlakového vstřikování plastů. Mezi nepoužívanější materiály pro výrobu koster touto technologií patří polyamid (PA), polyfenylsulfid (PPS), polyethyltereftalát (PET) nebo polybutyltereftalát (PBT). Při výběru materiálu je nutné brát ohled na teplotní třídu, nehořlavost, odolnost vůči plazivým proudům nebo odolnost při pouzdření [1].

## 1.9 VODIČE

Mezi nejčastěji používané vodiče pro výrobu vinutí induktivních prvků řadíme zejména měděné vodiče. Vodiče musí být povrchově upravovány, a to zejména z důvodu zajištění elektrické pevnosti, odolnosti vůči oděru nebo z důvodu zajištění požadované teplotní třídy. Volbou daného druhu izolace je zásadně ovlivněn jak výrobní proces, tak i samotná kvalita spolu s konečnými vlastnostmi vinutí. Při volbě povrchové úpravy je nutné brát ohled na případné pájení. Existují tzv. samopájitelné polyuretanové laky, které jsou řazeny do teplotní třídy B, což odpovídá teplotě do 130 °C. V případě vodičů se zesílenou izolací je teplotní třída závislá na konkrétním druhu izolace, opředení nebo počtu vrstev laku. U zesílené izolace můžeme dosahovat teplotních tříd F (155 °C), H (180 °C) nebo také teplotní třídy 200, což odpovídá 200 °C [1] [2].

## 2 PŘEHLED OBDOBNÝCH NAVÍJEČEK

V současnosti existuje celá řada firem, která se zabývá výrobou různých typů navíjecích a převíjecích strojů. Tato kapitola má poskytnout inspiraci na konstrukční typy pro samotný návrh prototypu navíječky. Princip lineárních navíječek různých výrobců je prakticky totožný, ale konstrukční řešení jednotlivých částí bývá velmi rozmanité. Nabízené navíječky na trhu můžeme rozdělit dle stupně automatizace na:

- Ruční navíječky
- Polo-automatizované navíječky
- Plně-automatizované navíječky

### 2.1 RUČNÍ NAVÍJEČKY

Tyto navíječky bývají nejčastěji ovládány ručně nebo disponují pohonem navíjení, ovládaným nožním pedálem. K provozu těchto navíječek není požadována žádná elektrická energie. Vřeteno navíječky je připevněno ke klice, jejímž otáčením vzniká rotační pohyb vřetene. Drát je na upnutou kostru cívky naváděn pomocí ruky obsluhy, kdy napětí drátu při navíjení může být regulováno zvýšením tření mezi rukou a drátem. Rychlost navíjení je ovlivněna použitým převodem a schopností obsluhy. Navíječka disponuje mechanickým počítadlem, sloužícím ke kontrole počtu závitů, což do jisté míry usnadňuje práci obsluze. V současnosti mají ruční navíječky stále své zastoupení v průmyslovém odvětví, ale jedná se většinou jen o výrobu malých solenoidových cívek, nebo jiných složitých cívek, u kterých by bylo zapotřebí v případě automatizovaných navíječek použití velmi drahých senzorů spolu s náročným naprogramováním celého procesu [24].



Obr. 14 Ruční navíječka [25]

### 2.2 POLO-AUTOMATICKÉ NAVÍJEČKY

V současnosti se jedná o nejpoužívanější typ navíjecího zařízení v průmyslu. Navíjení je zprostředkováno pomocí motorů a ovládacího panelu. Samotné navíjení je zautomatizováno, ale nastavení výchozí pozice nebo volba velikosti cívky je závislá na obsluze zařízení. Výhodou těchto navíječek oproti ručním navíječkám je především jejich vyšší výkonnost a rychlost, zároveň jsou také schopny splňovat vyšší výrobní nároky. Výhodou oproti plně

automatickým navíječkám je pak jejich menší a lehčí konstrukce a v neposlední řadě také nižší pořizovací náklady [24].



*Obr. 15 Polo-automatická navíječka [26]*

### 2.3 AUTOMATICKÉ NAVÍJEČKY

V případě automatických navíječek hovoříme o CNC strojích, jejichž provoz vyžaduje přítomnost celé řady senzorů sloužících ke kalkulaci a měření požadovaných výsledků, sofistikovaného softwaru a celou řadu další elektroniky. Úlohou obsluhy tohoto zařízení je pouze zadání požadavku na výrobu prostřednictvím počítače, který je často součástí navíječky. Software většinou již disponuje přednastavenými procesy na výrobu konkrétních produktů. Tyto navíječky jsou schopny pracovat velmi rychle a spolehlivě a jejich primární použití můžeme nacházet v sériových výrobních [24].



*Obr. 16 Automatická navíječka [27]*

## 2.4 AEH SERIES LINEAR WINDING MACHINE

Jedná se o navíječku firmy ACME Mechatronics, Inc. [11], která nabízí velkou škálu programovatelných navíjecích zařízení za použití vysoce kvalitních nástrojů pro 8051 a 80196 mikro kontrolerů a solid edge PLM software pro vytváření mechanického designu dle žádosti zákazníka. Navíječka AEH-01 (obrázek 14) disponuje vysokým točivým momentem se snadným programováním, speciálním provozem pro úpravu výkonu a distribučního transformátoru. Tloušťka navíjeného drátu je od 0,1 do 3,5 mm, šířka návinu je 150 mm a průměr cívky je 280 mm. Základní technické parametry lze vidět v tabulce 1 [12].

U tohoto modelu navíječky je brán velký ohled na stabilitu, což může být již na první pohled patrné vzhledem k robustnosti stroje. Konstrukce navíječky je poměrně masivní a samotné ovládání jednotlivých prvků stroje je velmi jednoduché. Umístění jednotlivých částí je řešeno vzhledem k funkčnosti celé sestavy intuitivně.

Tab. 1 Technické parametry AEH-01 [12]

Model		AEH-01
Š x H x V	(mm)	890 x 400 x 370
Tloušťka drátu	(mm)	0,1 – 3,5
Šířka návinu	(mm)	0 - 150
Max. otáčky	(ot/min)	8000
Spotřeba energie	(W)	800
Hmotnost	(kg)	55



Obr. 14 Navíječka AEH-01 [12]

## 2.5 CNC COIL WINDER MK5

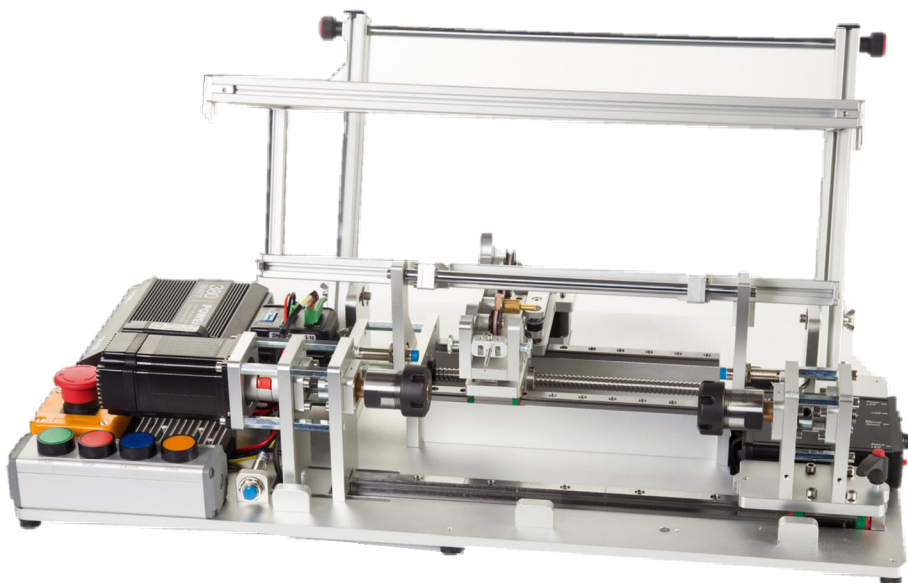
Tento model navíječky je vyráběn společností CNCDesign, která se zaměřuje na nízkonákladové řešení, které následně distribuují do celého světa. Navíječka MK5 (obrázek 15) je určena především pro menší podnikání případně pro kutily. Její hlavní předností je

široká škála možného vinutí, a to především díky softwaru, který firma vyvinula konkrétně pro jejich zařízení [13].

Tento koncept je již poměrně moderní a disponuje celou řadou jednotlivých vlastností, které jsou v dnešní době velice populární. Jako jeden z hlavních konstrukčních prvků je použit hliníkový profil, jehož poměrně nízká hmotnost a univerzálnost nabízí celou řadu konstrukčních možností. Základní technické parametry lze vidět v tabulce 2.

*Tab. 2 Technické parametry CNC coil winder MK5 [13]*

Model		CNC Coil Winder MK5
Š x H x V	(mm)	700 x 300 x 200
Tloušťka drátu	(mm)	0,01 – 0,5
Šířka navíjení	(mm)	0 - 200
Max. otáčky	(ot/min)	2000
Max. průměr cívky	(mm)	110
Hmotnost	(kg)	20-35



*Obr. 15 CNC coil winder MK5 [13]*

## 2.6 WH-751

Jedná se o zařízení od společnosti Ingrid West Machinery Ltd, která je předním evropským výrobcem strojů na navíjení cívek. WH-751 (obrázek 16) je stolní navíjecí stroj s digitálním ovládáním pro poloautomatický provoz. Díky systému řemenů a řemenic jde zvolit dva poměry pohonu vřetena tak, aby byla zajištěna široká škála kombinací točivého momentu a

rychlosti pro maximální všestrannost. Alternativně může uživatel, který požaduje vyšší rychlost upřednostnit možnost maximálního jednorázového rozsahu 3000 ot/min. Všechny základní parametry vinutí (rychlost vinutí, rozteč vodičů, zrychlení, brzdění, počet otáček) jsou digitálně ovládány a řízeny. Zařízení disponuje širokou škálou příslušenství jako je například vodičí hlava drátu, napínák, pedál s poměrnou rychlostí a další. Vzhledem k jeho všestrannosti se dá použít v obecné, výrobní či prototypové výrobě. Základní technické parametry jsou znázorněny v tabulce 3 [14].

Tab. 3 Technické parametry WH-751 [14]

Model	WH-751	
Š x H x V	(mm)	950 x 520 x 600
Tloušťka drátu	(mm)	0,02 - 3
Šířka navíjení	(mm)	0 - 300
Max. otáčky	(ot/min)	3000
Hmotnost	(kg)	58



Obr. 16 Navíječka WH-751 [14]

## 2.7 WDTC-01

Jedná se o počítačem řízený navíječ cívek, který disponuje jednou navíjecí hlavou. Tento poměrně malý CNC stroj slouží například pro výrobu vinutí obyčejných transformátorů, vysokofrekvenčních transformátorů, relé, elektromagnetických ventilů nebo navíjení vrstev. Mezi hlavní přednosti tohoto zařízení patří snadné nastavení dat pomocí řídicí jednotky, vysoká a přesná rychlost vinutí, automatické měření údajů o místě startu vinutí, popřípadě je schopen určit aktuální lokaci polohovacího zařízení. V zařízení lze nastavit až 999 různých specifikací produktu, což značně zefektivňuje výrobní proces. Stroj také disponuje nožním spínačem, který zprostředkovává pohodlné a rychlé výrobní operace. [5].

Tab. 4 Technické parametry WTDC-01 [5]

Model		WTDC-01
Š x H x V	(mm)	300 x 300 x 300
Tloušťka drátu	(mm)	0,01 - 1
Šířka navíjení	(mm)	0-100
Max. otáčky	(ot/min)	6000
Napájení	(V)	220/50-60 Hz
Hmotnost	(kg)	30

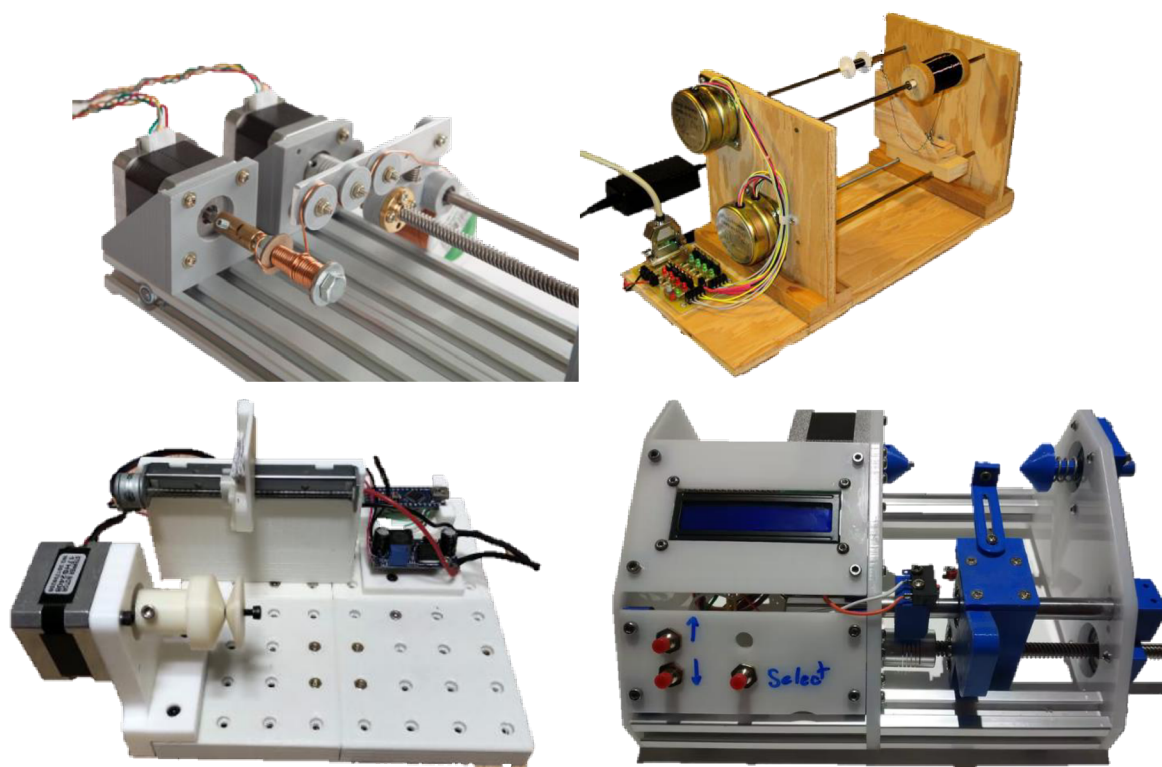


Obr. 17 Navíječka WH-751 [6]

Hlavní výhodou běžně dostupných lineárních navíječek na trhu je především garance určité kvality, funkčnosti zařízení a v případě poruchy snadná komunikace s výrobcem, či autorizovaným prodejcem. Dále pro jednotlivé typy navíječek můžeme zakoupit celou řadu přídatných zařízení. V současnosti na trhu figuruje celá řada společností, zabývajících se výrobou navíjecích zařízení, což vytváří jistý konkurenční boj. Díky této skutečnosti je dostupnost bližších informací týkajících se konstrukce, volby jednotlivých motorů a elektroniky značně omezena.

V průběhu vypracování kritické rešerše byla objevena celá řada různých kutilských prototypů, jejichž konstrukční řešení bylo pro samotný návrh naší navíječky v konečném důsledku daleko přínosnější, jelikož jejich konstrukce byla navrhována z běžně používaných a finančně dostupných materiálů. Konstrukce těchto prototypů, byla převážně řešena pomocí 3D tisku, hliníkových profilů nebo překližky. Příklady těchto navíječek jsou znázorněny na obrázku 18.





*Obr. 18 Typy prototypových naviječek [7] [8] [10] [23]*

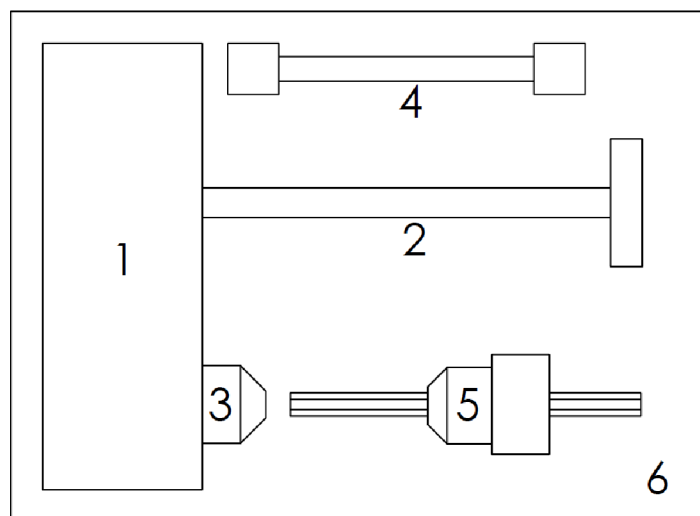
### 3 ZVOLENÁ KONCEPCE

Na základě kritické rešerše obdobných navíječek od různých výrobců a dalšího zabývání se danou problematikou je tato kapitola zaměřena na samotný návrh konceptu navíječky, výběr jednotlivých komponent, zdůvodnění jejich výběru a nastínění jiných variant, které byly uvažovány při vytváření konceptu. Při návrhu konceptu bylo nutné dbát na splnění základních požadavků definovaných v zadání diplomové práce:

- Maximální hmotnost navrženého zařízení nesmí přesáhnout 15 kg
- Rozměry zařízení musí být stanoveny tak, aby šlo umístit na stůl o ploše 1 m<sup>2</sup>
- Možnost upnutí kostry cívky o mezní délce okna jádra cívky 70 mm a mezní šířce navinuté cívky 30 mm

#### 3.1 SCHÉMA KONCEPTU

Správné rozmístění jednotlivých komponent navíječky je velmi podstatným krokem, a to především proto, aby se předešlo případným kolizím, servisním komplikacím a byla zajištěna co největší bezpečnost při jejím používání. Na obrázku 19 je znázorněno rozmístění hlavních prvků navíječky. Prostor pro umístění řídicího panelu a motorů, které pohánějí kuličkový šroub a návin (pozice 1), kuličkový šroub (pozice 2), rotační trn pro rotační pohyb kostry cívky (pozice 3), zásobník cívky určené pro navíjení (pozice 4), posuvný trn pro uchycení jádra cívky (pozice 5), základní deska pro uchycení jednotlivých prvků (pozice 6).

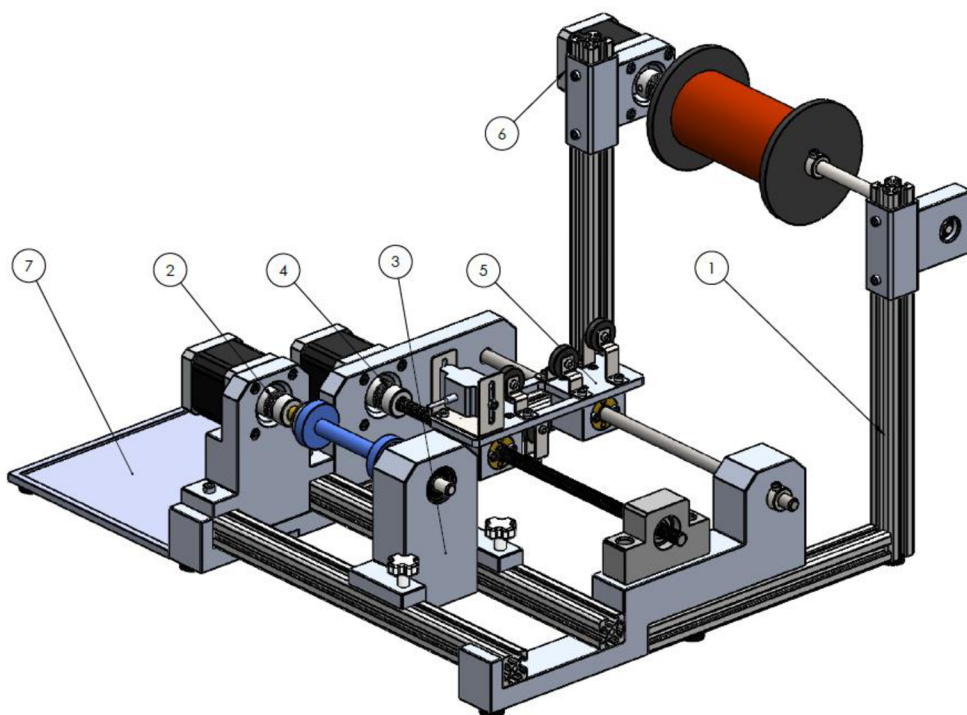


Obr. 19 Schéma návrhu navíječky

Další uvažovanou variantou bylo připnutí hřídele přímo na krokový motor (pozice 3) a následného nasunutí a zajištění kostry cívky na tuto hřídel. Při této variantě by nám odpadla sestava posuvného trnu (pozice 5). Od tohoto konceptu bylo nakonec upuštěno. Mezi hlavní důvody tohoto rozhodnutí patřila horší variabilita oproti variantě znázorněné na obrázku 19. Dále zde byly větší předpoklady pro méně kvalitní navíjecí vlastnosti a kostry cívek by musely obsahovat poměrně velký otvor pro nasunutí na rotační hřídel, což by přímo ovlivnilo minimální průměr kostry cívky.

### 3.2 KONCEPT NAVRŽENÉ NAVÍJEČKY

V závislosti na kritické rešerši a bližším zkoumání problematiky byla navržena konstrukční část prototypové stolní lineární navíječky (obrázek 20) o mezních rozměrech 450x410x255 mm. Umístění základních částí navíječky koresponduje se schématem návrhu navíječky znázorněném na obrázku 19. Navržený koncept disponuje třemi krokovými motory sloužící k pohonu navíjecí, posuvné a odvíjecí části (pozice 2,4,6). Hlavní nosná konstrukce celého zařízení (pozice 1) se skládá ze dvou základních konstrukčních prvků, konkrétně z hliníkových profilů a na zakázku vyráběných bočnic. Další navrženou částí je posuvná konzole (pozice 3), sloužící pro upnutí kostry cívky. Nedílnou součástí navíječky je posuvný naváděcí systém drátu (pozice 6), který je pomocí trapézového šroubu připevněného ke krokovému motoru ovládán. Pozici 7 reprezentuje plastový plát sloužící pro umístění řídicí jednotky a ovládacího panelu. U této části je počítáno s následným zakrytím řídicího systému a umístěním ovládacích prvků navíječky jako je například displej, regulátor otáček, tlačítko stop a další.



Obr. 20 Konceptní návrh navíječky

Kostra cívky znázorněná modrou barvou odpovídá mezní délce jádra cívky uvedené v zadání. Z konceptního návrhu je tedy patrné, že rozměrové parametry navíječky jsou značně naddimenzovány. Důvodů vedoucích k tomuto rozhodnutí byla celá řada. Jedním z primárních důvodů bylo umožnění navíjet v budoucnu cívky i o větších rozměrech. Dalším z důvodů bylo vytvoření dostatečného manipulačního prostoru, jak pro samotný provoz navíječky, tak i pro případný servis. Více místa dává prostor pro umístění přídatných zařízení nebo různých senzorů. Z ekonomického hlediska by byl cenový rozdíl v případě použití krašších hliníkových profilů, hlazených tyčí a trapézového šroubu téměř zanedbatelný.

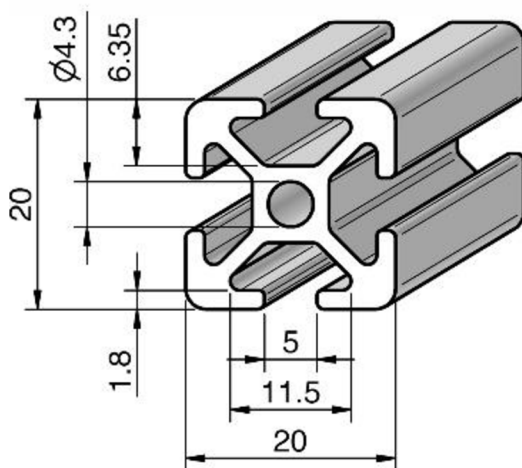
### 3.3 HLINÍKOVÉ PROFILY

Hliníkové profily jsou výborným konstrukčním prvkem pro jakékoliv prototypové zařízení, a to především z důvodu jejich univerzality a snadné přestavitelnosti. Celková hmotnost navíječky je jedna ze stěžejních podmínek konceptu, což je další argument pro výběr právě hliníkového profilu.

Pro tento koncept jsou zvoleny profily a spojovací prvky stavebnicového typu. Jako základní konstrukční prvek byl zvolen profil 20x20 s drážkou 5 mm (obrázek 21). Mezi hlavní výhody hliníkových profilů patří hmotnost, univerzality, pevnost a snadná konfigurace s jinými prvky. Pro zhotovení konstrukce je použita celá řada spojovacích prvků, které jsou dodávány stejnou společností, jako profily samotné.

Do budoucna jsou uvažovány další vylepšení a úpravy (jiné navíjecí požadavky), umístění senzorů, výměna jednotlivých komponent, což vyžaduje snadnou demontáž a zpětnou montáž jednotlivých částí zařízení, aniž by došlo k jejich poškození.

Požizovací náklady těchto profilů jsou sice vyšší než u jiného materiálu (překližka, PVC, 3D tisk, ohýbané plechy), ale v případě využití u prototypového zařízení, kde umístění jednotlivých částí není mnohdy finální, je cena těchto profilů relevantní. Když prototyp dospěje k finální verzi, můžeme začít uvažovat o nahrazení těchto profilů za levnější materiál, který bude plnit stejnou funkci a bude odpovídat stanoveným požadavkům.



Obr. 21 Hliníkový profil [9]

### 3.4 BOČNICE

Mezi základní konstrukční prvek konceptu patří bočnice, na které jsou následně připevněny další části zařízení. Při návrhu těchto bočnic byl kladen důraz na hmotnost, pevnost, kvalitu, ale také na cenu. Na základě těchto požadavků byly uvažovány varianty materiálu jako 3D tisk, dřevěná překližka a slitina hliníku 6061.

### 3.4.1 SLITINA HLINÍKU 6061

Jelikož je navržený koncept navíječky určen pro navíjení drátů o malých průměrech, je nutné zajistit co nejvyšší přesnost a stabilitu zařízení. Slitina hliníku 6061 je běžně používána v konstrukčních řešeních. Její hlavní předností je dobrá pevnost a odolnost při zachování nízké hmotnosti. Vyniká dobrou obrobiteľnosť a svařitelností. Vlastnosti této slitiny nejvíce odpovídaly našim požadavkům. V 3D programu byl vytvořen model bočnic s výkresovou dokumentací pro následné zaslání externí firmě s požadavkem na výrobu těchto součástí (obrázek 22).

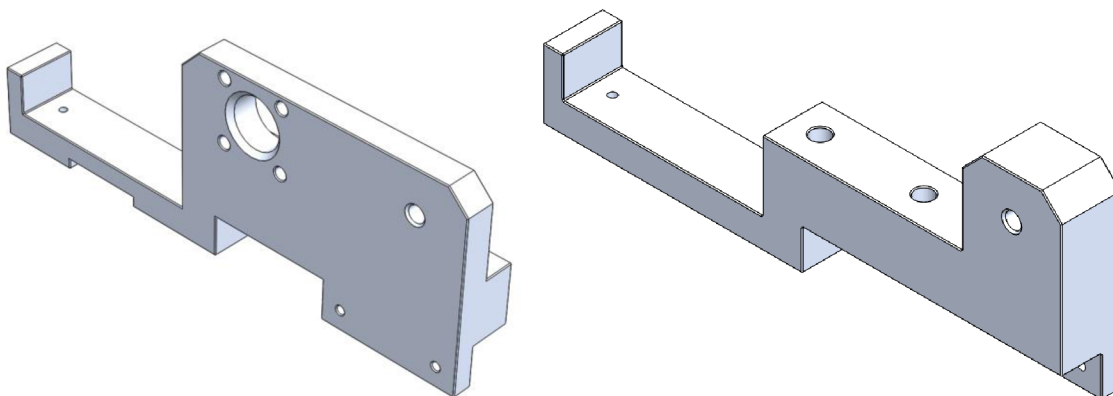
### 3.4.2 DALŠÍ UVAŽOVANÉ VARIANTY

V současnosti se 3D tisk stává nedílnou součástí konstrukčního světa, a to především pro jeho dostupnost, ale také pro jeho fyzikální i mechanické vlastnosti. V našem případě byl 3D tisk uvažován jako první varianta. Důvodem byla především skutečnost, že firma 3D tiskárnami disponuje, což by významně ovlivnilo cenu vyráběných dílů. Nevýhodou této varianty byla nižší odolnost a pevnost oproti slitině hliníku 6061. Pro současný koncept proto nebyla zvolena, ale v budoucnosti by zde mohla najít svoji využitelnost.

Další uvažovanou variantou bylo použití překližky. Toto řešení by bylo finančně nejvýhodnější, ale z dlouhodobého hlediska by zde docházelo ke značné ztrátě kvality z hlediska opotřebení. V případě použití překližky by oproti předchozím variantám klesla kvalita designu celého konceptu. Na základě těchto postřehů bylo od této varianty také odstoupeno.

Do současného konceptu byly vymodelovány bočnice s následujícími parametry:

- Materiál – Slitina Al 6061
- Tloušťka obráběného polotovaru – 30 mm
- Délka bočnic – 260 mm
- Jmenovitá výška – 96 mm
- Typy otvorů – Otvor pro uchycení krokového motoru a otvory pro vodící tyč
- Typy děr – pro šrouby M3 k uchycení krokového motoru, pro šrouby M4 k uchycení hliníkových profilů k bočnicím a díry se závitem pro šrouby M9 k uchycení držáku trapézového šroubu
- Hmotnost – levá bočnice 820 g, pravá bočnice 750 g



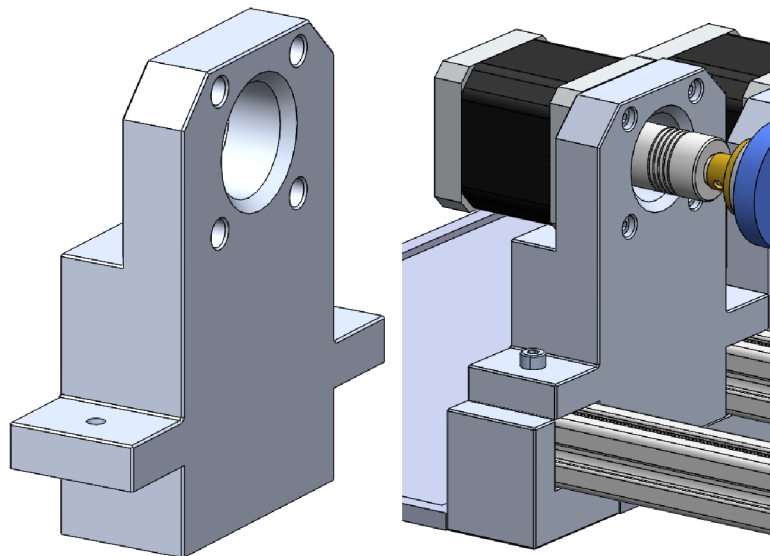
Obr. 22 Levá a pravá bočnice

### 3.5 KONZOLE UCHYCENÍ ROTAČNÍ ČÁSTI

Tato konzole je vyráběna ze stejného materiálu jako bočnice. Na její tělo je připevněn krokový motor pohánějící navíjení drátu na kostru cívky. Tento obrobek je vyráběn z hliníkového polotovaru o tloušťce 30 mm. Montáž této obráběné součásti je zajištěna pomocí dvou šroubů M4, kterými je připevněna k hliníkovým profilům v levé části navíječky (obrázek 23).

Základní parametry:

- Materiál – slitina Al 6061
- Max tloušťka – 30 mm
- Výška – 103 mm
- Šířka – 100 mm
- Hmotnost – 405 g
- Typy děr – pro šrouby M3 k připevnění krokového motoru ke konzoli, pro šrouby M4 pro uchycení k hliníkovým profilům



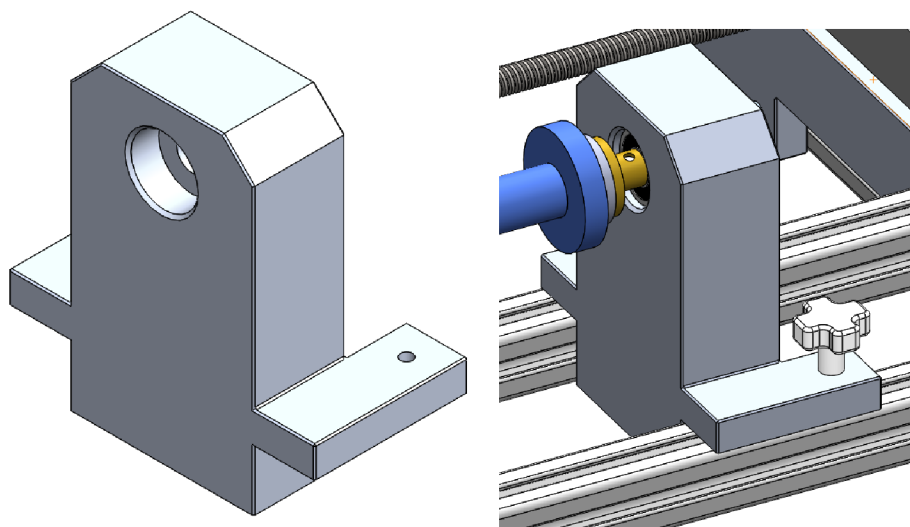
*Obr. 23 Konzole krokového motoru pro návin drátu na kostru cívky a jeho montáž*

Dalším konstrukčním prvkem je posuvná konzole (obrázek 24), sloužící k uchycení kostry cívky a zajištění jejího následného návinu. Vykroužené otvory jsou určeny pro vložení dvou radiálních kuličkových ložisek 608-2RS. Do těchto ložisek je následně vsunuta hřídel zajišťující rotační pohyb kostry cívky. Konzole je umístěna na dvou hliníkových profilech, po kterých je posouvána v závislosti na délce kostry cívky. Následně je dvěma aretačními šrouby dotažena, aby při návinu nedošlo k jejímu posunutí, což by způsobilo vychýlení nebo vypadnutí kostry cívky.

Základní parametry:

- Materiál – slitina Al 6061
- Max. tloušťka – 30 mm

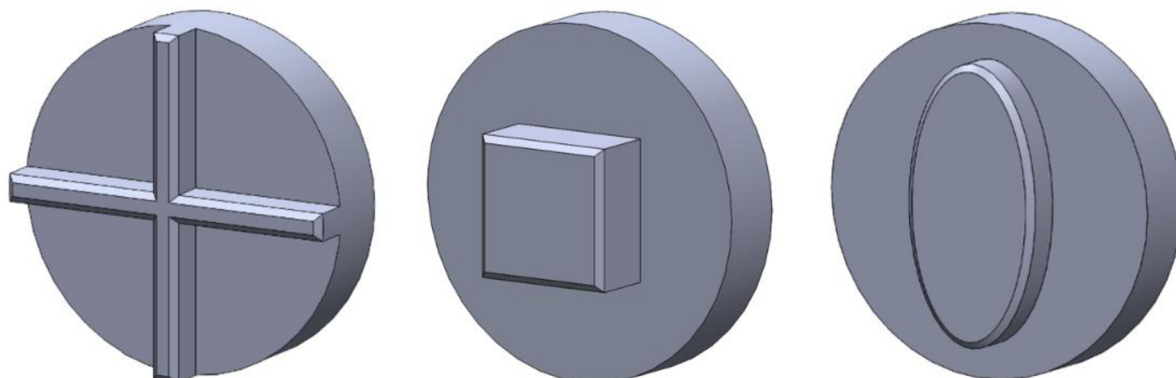
- Výška – 103 mm
- Šířka – 100 mm
- Hmotnost – 530 g
- Typy děr – pro šrouby M4 k aretaci konzole, pro vložení radiálních kuličkových ložisek



*Obr. 24 Posuvná konzole pro uchycení kostry cívky a její montáž*

### 3.6 UCHYCENÍ KOSTRY CÍVKY

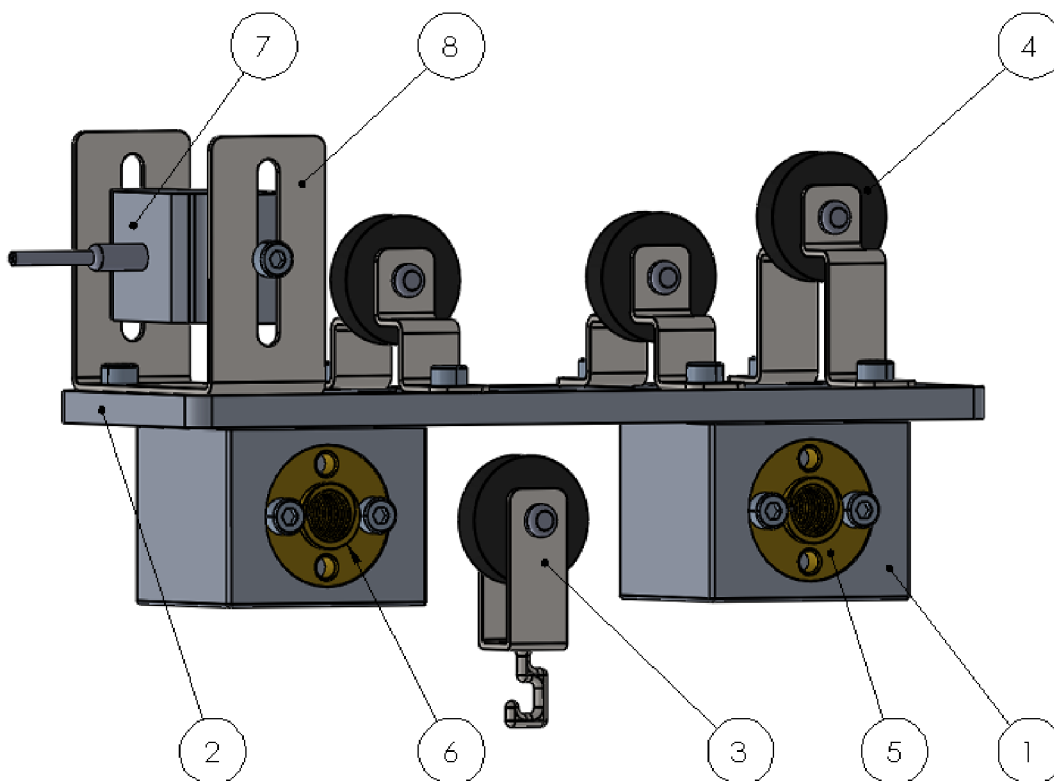
Kostry cívek jsou pro vývojové centrum vyráběny interně pomocí 3D tiskáren. Na základě této skutečnosti byly navrženy základní tvary pro upnutí kostry cívky do navíjecí části zařízení (obrázek 25). Připevnění těchto komponent je řešeno šroubovými spoji k rotující hřídeli. Výhodou interního tisku je především rychlá reakce na měnící se požadavky vývoje, nižší pořizovací náklady a dobrá komunikace. Tyto přípravky pro uchycení kostry cívky jsou tisknuty z tiskové struny PLA. Jedná se o nejpoužívanější materiál v 3D tisku. Je vhodný pro tisk jak malých detailních výrobků, tak i těch robustnějších [21].



*Obr. 25 Přípravky pro uchycení kostry cívky*

### 3.7 POSUVNÝ NAVÁDĚCÍ SYSTÉM DRÁTU

Stěžejní částí navijecího zařízení je naváděcí systém zajišťující soustavný posun za stálého návinu (obrázek 26). K tomuto účelu byla navržena sestava, jejíž posun je zajištěn trapézovou tyčí, která je poháněna krokovým motorem. Trapézová tyč prochází trapézovou maticí (pozice 6), která je pomocí dvou šroubů M3 přišroubována k nakupované součásti sloužící k uložení mosazné matice (pozice 1). Obdobně je řešeno uchycení celé sestavy na vodící tyč, která prochází pozicí 5. Jedním ze základních prvků této sestavy je hliníková základna (pozice 2), na kterou jsou přišroubovány další stěžejní části tohoto konceptu. Mezi tyto části patří porcelánová sada vodících kladek drátu (pozice 4). Tato sestava se skládá z vodící kladky o průměru 20 mm obsahující kuličkové ložisko s porcelánovou vložkou, uchycení kladky je řešeno pomocí stojin z ohýbaného plechu o tloušťce 1 mm a šroubů M3 sloužících k připevnění této sestavy k hliníkové základně. Další důležitou součástí je přípravek pro uchycení sestavy s naváděcí tryskou (pozice 8). Tento přípravek je také zhotoven z ohýbaného plechu o tloušťce 1 mm a obsahuje díry pro šrouby M3 za účelem připevnění přípravku k základně. Veškeré ohýbané plechové dílce jsou vyráběny interně, jelikož firma disponuje plechovými vysekávačkami a ohýbačkami. Hliníková základna je vyráběna ze stejného materiálu a stejným způsobem jako bočnice. Sestava trysky (pozice 7) se skládá ze dvou základních částí. První částí je přípravek pro uchycení naváděcí trysky, který je vyráběn interně pomocí 3D tisku obdobně jako přípravky pro uchycení kostry cívky. Druhou částí je naváděcí tryska, sloužící k navádění drátu ke kostře cívky. Jedná se o nakupovanou součást. Uchycení k plechovému přípravku je zprostředkováno pomocí dvou šroubů M3.



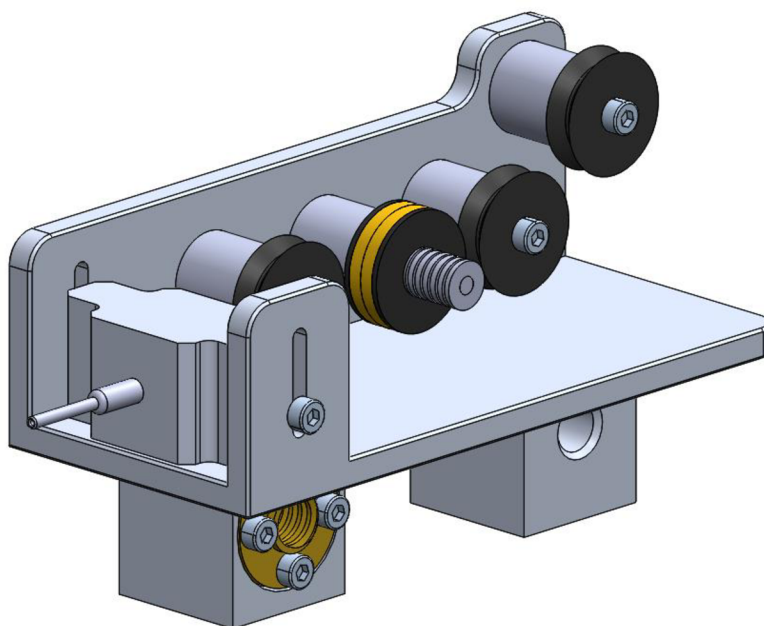
Obr. 26 Posuvný naváděcí systém drátu



Velkou předností tohoto konceptu je jeho jednoduchost, snadná smontovatelnost a případný servis jednotlivých komponent sestavy. Jednoduchost tohoto posuvného zařízení umožňuje snadnou výměnu naváděcích kladek za kladky s jiným průměrem, což zajišťuje poměrně dobrou variabilitu celého zařízení. Naváděcí trysky jsou vyráběny se stejným vnějším průměrem, ale odlišným vnitřím v závislosti na průměru drátu. Tato skutečnost nám umožňuje snadnou výměnu naváděcích trysek, aniž bychom museli upravovat samotný přípravek pro jejich uchycení. Hmotnost navrženého konceptu celé sestavy je 550 g.

Při návrhu posuvného zařízení byla uvažována ještě druhá varianta (obrázek 27). Základna tohoto konceptu byla navržena ze slitiny hliníku 6061 a další její základní součásti byly k základě přivařeny. Naváděcí kladky byly k základně připevněny pomocí šroubu M4 a distančních válečků. Tento koncept nakonec nebyl použit na základě těchto skutečností:

- Jednotlivé komponenty by byly převážně vyráběny externě, což by automaticky zvedlo celkové náklady
- Variabilita konceptu by nebyla tak rozsáhlá, jako u námi zvoleného konceptu
- Řešení předepnutí drátu v tomto konceptu by bylo značně složitější a méně efektivní



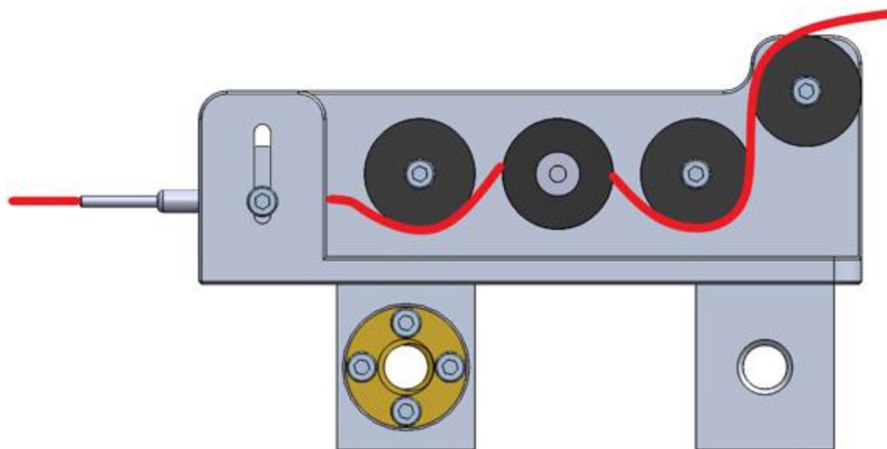
Obr. 27 Nepoužitá varianta posuvného naváděcího systému drátu

### 3.8 PŘEDPNUTÍ DRÁTU

Jedním ze základních předpokladů pro kvalitní navíjení, je zajištění předepnutí drátu. Při předpínání drátu může dojít ke dvěma základním problémům. Prvním je nedostatečné předepnutí drátu, kdy navíjený drát na cívku není dostatečně dotažen, což často vede ke vzniku mezer na cívce. Tím druhým je naopak přílišné předepnutí drátu, kdy může docházet k poškození jeho povrchové úpravy nebo dokonce k přetržení, což negativním způsobem

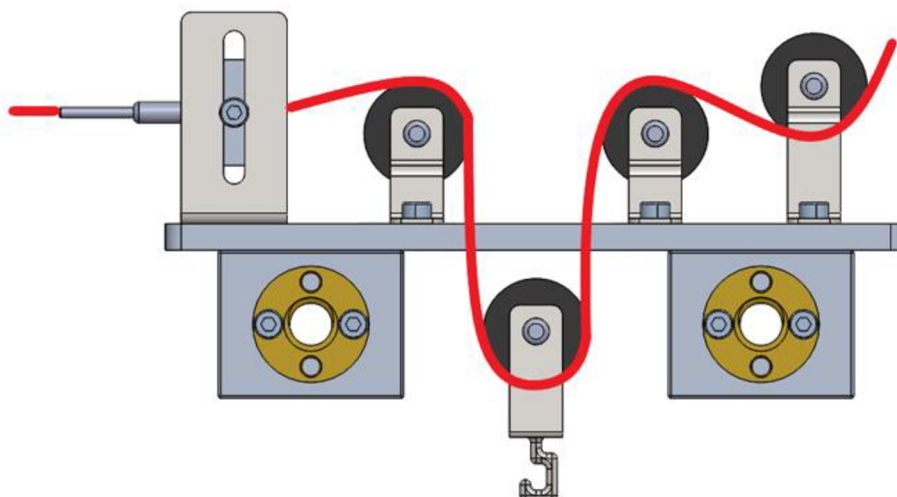
mění vlastnosti navíjeného drátu. Na základě těchto skutečností byly uvažovány následující varianty předeptnutí:

První uvažovanou variantou bylo vložení předeptinacího mechanismu mezi naváděcí kladky (obrázek 28). Tento mechanismus je sestaven z plechových podložek, na které jsou nalepeny plstěné podložky. Úkolem plstěných podložek je vytvořit tření, které zajistí předeptnutí drátu. Samotným principem tohoto systému je vložení drátu mezi dvě podložky, které jsou nasunuty na šroub. Následně jsou podložky pomocí matice dotaženy tak, aby mezi sebou svíraly navíjený drát. Výhodou této varianty je snadná manipulovatelnost, nízké pořizovací náklady a použitelnost pro různé průměry drátu. Nevýhodou je složité zajištění stejného předeptnutí pro více kusů stejných cívek. Pro výrobu prototypu cívky je tento koncept dostačující, ale v případě vzniku složitějších požadavků na vyráběnou cívku, by zde mohly vzniknout komplikace.



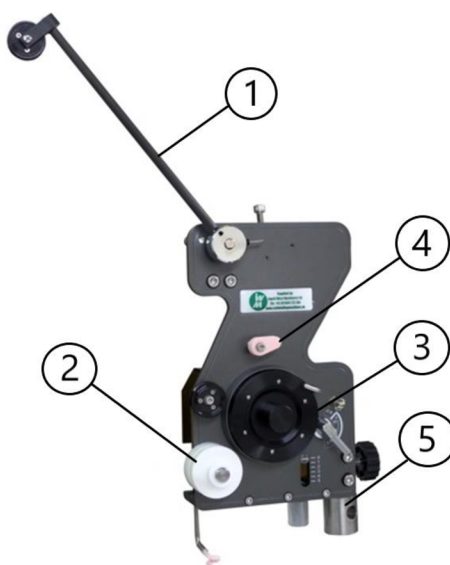
*Obr. 28 Předeptnutí drátu pomocí polstrovaných podložek*

Druhou uvažovanou variantou bylo použití gravitační kladky (obrázek 29). Součástí tohoto mechanismu je kromě naváděcích kladek také kladka gravitační. Tato kladka není s posuvným naváděcím systémem pevně spojena, ale bývá zavěšena na navíjený drát cívky. Již samotné zavěšení na drát zajistí určité předeptnutí drátu na základě hmotnosti kladky samotné. Součástí této kladky je také sestava obsahující háček sloužící k zavěšení závaží v závislosti na potřebné velikosti předeptnutí. Výhodou této varianty oproti variantě předešlé je zejména zajištění konstantního předeptnutí navíjeného drátu. Pořizovací náklady tohoto konceptu jsou srovnatelné s variantou 1. Tento koncept je vhodný pro různé průměry navíjeného drátu. Hlavní nevýhodou tohoto návrhu je delší čas přípravné fáze, čímž je myšleno, nachystání požadovaného závaží, zavěšení gravitační kladky na drát a nutnost opakování tohoto postupu při každé výměně navíjeného drátu.



Obr. 29 Předepnutí drátu pomocí gravitační kladky

Třetí variantou bylo použití mechanického napínače (obrázek 30). Jedná se o nakupované přídatné zařízení od společnosti Ingrid West Machinery Ltd [15], které zajišťuje předepnutí navíjeného drátu. Mechanismus je umístěn separátně vedle naviječky. Odvíjený drát je ze zásobníku přiveden do napínače. Po provlečení drátu napříč celým zařízením je jeho funkčnost následující: Poloha ramene (pozice 1) zprostředkovává zpětnou vazbu systému a nastavuje hlavní třecí kolo (pozice 3) sloužící k regulaci a držení konstantního napětí v průběhu navíjecího cyklu. Další částí tohoto zařízení jsou plstěné podložky (pozice 2) zajišťující předpětí a odstraňování nečistot z drátu. Ochranu drátu před mechanickým poškozením a jeho vedení zajišťují keramická očka (pozice 4) a válečková vedení. Cena tohoto zařízení se pohybuje zhruba od 3500 Kč [15]. Hlavní výhodou mechanického napínače je spolehlivé zajištění konstantního napětí drátu během navíjení. Nevýhodou je využitelnost napínače pro určitou škálu průměru drátu. Pro splnění zadání práce, kde je rozsah průměru drátu stanoven od 0,07 – 0,4 mm, by bylo zapotřebí těchto napínačů více, což by se zásadně projevilo na konečné ceně zařízení.

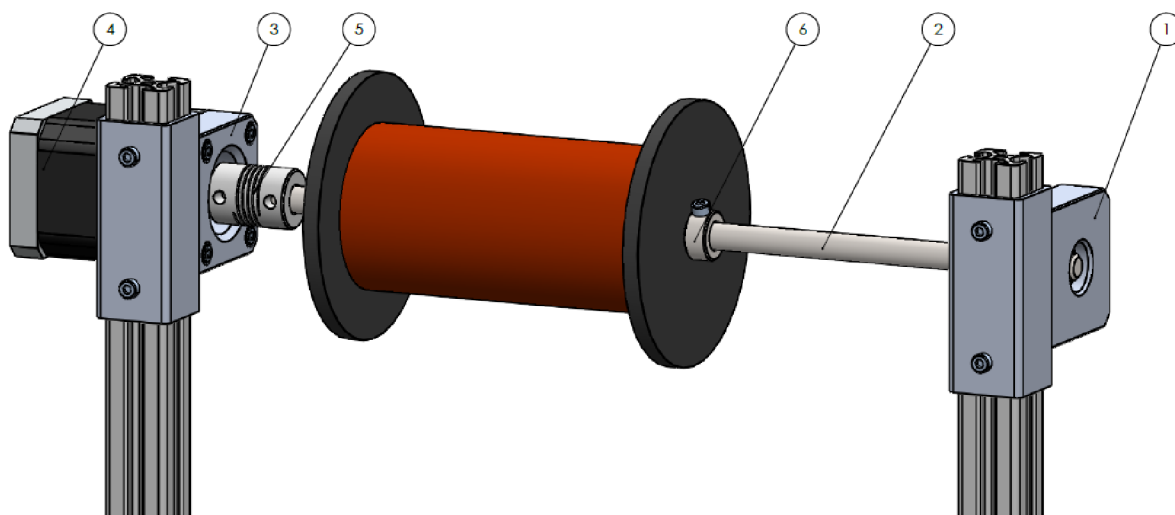


Obr. 30 Mechanický napínač Model TCL-X [15]

Jelikož výroba těchto prototypových cívek je v současnosti spíše nárazová, byla pro navržený koncept zvolena varianta 2, ve které je použita gravitační kladka. Oproti variantě 1 disponuje daleko spolehlivější kontrolou předeprnutí, je cenově dostupnější oproti variantě 3 a pro využití ve vývojovém centru dostačující. Při návrhu navíječky byl brán ohled i na možné využití varianty 3 v budoucnosti, a to především v případě zvýšení množství vyráběných prototypových cívek s podobnými vlastnostmi. V tomto případě by využití varianty 3 dávalo větší smysl i na úkor vyšších pořizovacích nákladů.

### 3.9 ODVÍJECÍ SYSTÉM NAVÍJEČKY

Pro kvalitní navíjení je potřeba zajistit stabilní přísun drátu. Za tímto účelem byl navržen koncept otáčející kostrou cívky, na kterou je navinut drát požadovaných vlastností. Jelikož se v našem případě jedná o prototypové kusové navíjení, není nutné využívat plně navinutou cívku. V praxi nejčastěji dochází k převíjení požadovaného množství drátu z dodávané cívky na prototypovou, která je navržena tak, aby její nasunutí na hlazenou tyč o průměru 8 mm (pozice 2) odvíjecí části navíječky bylo co nejnadhnější a intuitivní. Následně je pomocí dvou dorazových kroužků (pozice 6) kostra cívky zajištěna proti nežádoucímu pohybu. Hlazená tyč je pomocí spojky (pozice 5) připojena ke krokovému motoru (pozice 4). Důvodem návržení poháněné odvíjecí části navíječky bylo zajištění lepší kontroly nad odvíjením. Při správné synchronizaci s posuvnou částí a navíjecí částí konceptu bude zajištěno konstantní napětí drátu při odvíjení čili nebude docházet k prověšení nebo zbytečně velkému předpínání drátu. Odvíjecí systém je na hliníkové profily připevněn pomocí navržených držáků (pozice 1,3), které jsou vyráběny z hliníku 6061. Držák označen pozicí 1 disponuje otvorem pro vložení kuličkového ložiska pro zajištění rotačního pohybu hlazené tyče. Druhý držák slouží k uchycení krokového motoru obdobně jako u posuvné a navíjecí části zařízení. Celý tento systém je možné po hliníkových profilech posouvat dle potřeby.



Obr. 31 Odvíjecí systém navíječky

Při návrhu odvíjecího systému byla uvažována také varianta bez použití krokového motoru, kdy by odvíjení zajišťoval samotný návin drátu na kostru cívky. Koncept byl navržen tak, že hlazená tyč byla k hliníkovým profilům umístěna fixně bez možnosti rotace a rotační pohyb vykonával pouze zásobník s navíjeným drátem. Zásobník bylo nutné přibrzďovat, a to především z důvodu předcházení případného prověšení drátu při navíjení, což by mohlo vést

k vypadnutí drátu z naváděcích kladek. Brzdění bylo zajištěno pomocí brzdicích kroužků, které při návinu vytvářely odpor vůči otáčení zásobníku. Ekonomické náklady na tuto variantu by byly sice nižší a odpadla by zde nutnost zapojování dalšího krokového motoru a jeho synchronizace, ale zásadní výhodou užití krokového motoru je získání větší kontroly nad samotným průběhem navijení, což byl rozhodující faktor pro vybrání použité varianty.

### 3.10 KROKOVÝ MOTOR

Při navrhování strojů a zařízení se často setkáváme s požadavkem na přesné polohování pohyblivých částí. Krokový motor tento požadavek na rozdíl od stejnosměrného nebo střídavého motoru splňuje daleko lépe, a to i bez nutnosti použití koncových spínačů, enkodérů brzdy nebo spojky. Využití motoru tohoto typu velmi často nacházíme v menších zařízeních [16].

Mezi hlavní výhody krokového motoru lze zařadit [16]:

- Přímě úměrný úhel natočení počtu vstupních impulsů
- Přímě úměrná rychlost otáčení frekvenci vstupních impulsů
- Řízení v otevřené smyčce bez nutnosti polohové zpětné vazby
- Motor rychle a přesně reaguje na změnu rychlosti a změnu směru otáčení
- Disponuje nekumulativní chybou polohování ( $\pm 5\%$  z kroku úhlu)
- Díky velkému točivému momentu při nízkých rychlostech otáčení není nutné používat převodovku
- Disponuje velkým statickým momentem
- Možnost aretace při zastaveném stavu
- Provoz motoru je obousměrný
- V případě přetížení může být motor zastaven bez poškození
- Vyšší životnost díky absenci kartáčků a kumutátorů.
- Uložení rotoru v přesných kuličkových ložiscích

Mezi hlavní nevýhody krokového motoru pak řadíme [16]:

- Náchylnost k rezonancím při určitých rychlostech otáčení
- Není vhodný pro příliš vysoké rychlosti otáčení
- V případě ztráty kroku dochází ke ztrátě polohy poháněného stroje a musí dojít k inicializaci systému
- Menší točivý moment oproti stejnosměrnému a střídavému motoru při podobné velikosti

Existují 3 základní typy krokových motorů, a to motor s proměnnou reluktancí, motor s rotorem tvořeným permanentním magnetem a hybridní motor. Pro naše navijecí zařízení je nejvýhodnější motor hybridní.

#### 3.10.1 HYBRIDNÍ MOTOR

V současnosti je tento typ krokového motoru v průmyslových aplikacích využíván prakticky nejčastěji. U tohoto typu motoru rotor disponuje na hřídeli z nemagnetického materiálu dvěma pólovými nalisovanými nástavci. Mezi tyto nástavce je umístěn axiálně polarizovaný permanentní magnet, jehož důsledkem dochází ke zmagnetování pólových nástavců na opačnou polaritu. Tyto nástavce disponují na svém obvodu drážkami tvořící ozubení. Počet

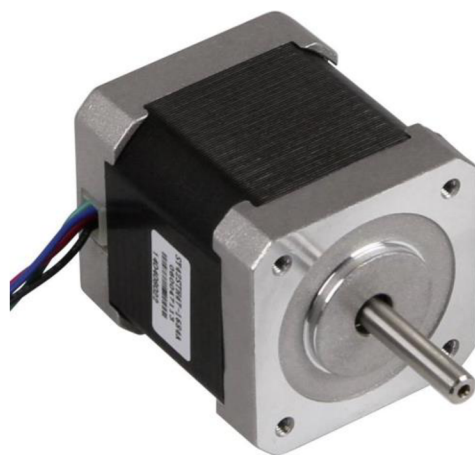
těchto drážek pak určuje velikost kroku. Počty zubů statoru a rotoru nejsou totožné, většinou je volen vyšší počet zubů u rotoru [16].

Výroba těchto motorů je nejčastěji prováděna dle doporučení NEMA (National Electrical Manufacturers). Standardním provedením bývá nejčastěji čtvercová příruba. Velikost motoru je určena dle délky strany příruby v palcích. Tento typ motorů bývá vyráběn celou řadou výrobců a jejich tvar, délka i celkové provedení může být velmi odlišné. U těchto motorů se ale dá předpokládat, že čím je motor delší, tím větší je očekávaný točivý moment. Motory různých výrobců se řídí NEMA normalizací, ale to neznamená, že na základě pevně stanovené velikosti příruby, jsou i ostatní parametry motoru totožné napříč různými výrobci. Jedním z nejčastěji lišícím se parametrem je točivý moment, který je mnohdy řádově odlišný u motoru stejného značení. Mezi nejběžnější velikosti motorů NEMA řadíme 8, 11, 17, 23, 34 a 42 [16].

Na základě výše rozebrané problematiky krokových motorů byl zvolen krokový motor Joy-it NEMA 17-01 (obrázek 32), jehož technické parametry jsou uvedeny v tabulce 4. Cena tohoto motoru je 809 Kč [17].

*Tab. 4 Technické parametry krokového motoru Joy-it NEMA 17-01 [17]*

Model		Joy-it NEMA 17-01
Š x V x H	(mm)	42,3 x 42,3 x 47
Průměr hřídele	(mm)	5
Počet kroků na 1 otáčku		200
Brzdňý moment	(Nm)	0,4
Max. fázový proud	(A)	1,68
Jmenovité napětí	(V)	2,8
Krok úhel	(°)	1,8
Počet fází		2



*Obr. 32 Krokový motor Joy-it NEMA 17-1 [17]*

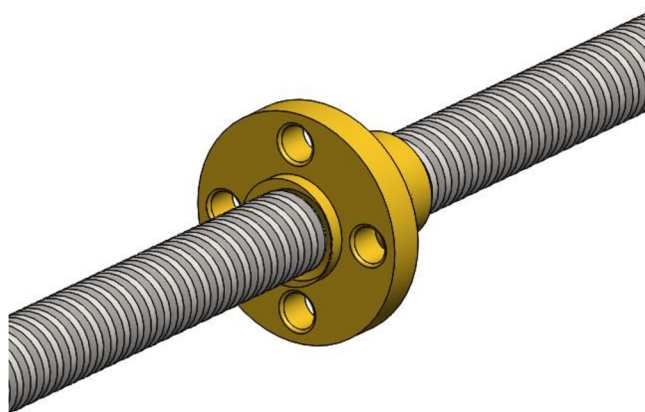
Tento krokový motor je v navrženém konceptu použit pro navíjecí část, posuvnou část a odvíjecí část zařízení. Důvodem použití stejného typu motoru na všech částech je především snadnější synchronizace celého procesu navíjení. V případě použití stejnosměrného nebo střídavého motoru u jedné z těchto částí by docházelo ke složitější synchronizaci, což by mohlo způsobit horší kvalitu výsledného produktu.

### 3.11 TRAPÉZOVÝ ŠROUB

Hlavní vlastností trapézového šroubu je převádění kruhového pohybu na pohyb přímočarý. Závít tohoto šroubu, respektive jeho průřez odpovídá rovnoramennému lichoběžníku s úhlem o velikosti  $15^\circ$  a vrcholovým úhlem o velikosti  $30^\circ$ . Jedná se o takzvané pohybové závity, jejichž předností je snášení vysoké míry tření. Důsledkem této skutečnosti je obvykle samosvornost závitové části šroubu. Hlavní výhodou samosvornosti je, že v klidové pozici nemusí být závit nijak zvlášť zajištěn [22].

Trapézové šrouby se nejčastěji využívají jako vodící šrouby soustruhů, dále své uplatnění nacházejí jako pohybové závity ve vřetenových lisech, u zvedacích zařízení, vstřikovacích lisů, k přepravování na montážních linkách a u celé řady dalších zařízení obsahující posuvné části [22].

Pro námi navrženou navíječku byla vybrána trapézová tyč o průměru 8 mm, stoupáním 1,5 mm, délce 270 mm a hmotnosti 100 g (obrázek 33). Tato tyč je spojena s krokovým motorem pomocí spojky, spojující hřídel krokového motoru a trapézové tyče. Posuv po trapézové tyči zajišťuje mosazná matice, která je k vybrané tyči dodávána (obrázek 33). V našem případě je matice pomocí dvou šroubů M3 připevněna k posuvnému naváděcímu systému drátu, čímž je zajištěn lineární posun tohoto systému.



Obr. 33 Trapézová tyč T8 s mosaznou maticí

## 4 KONTROLA KRITICKÝCH UZLŮ

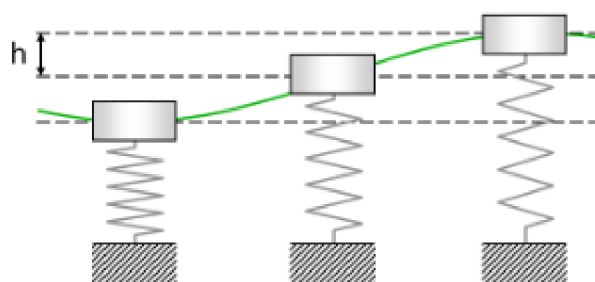
Pro kontrolu těchto uzlů byla vybrána metoda konečných prvků, která spočívá v řešení spojitého problému, který je následně převeden na problém diskrétní. Postup při řešení úloh za pomoci této metody je následující [28] [29]:

- vytvoření 3D geometrie navržené součásti
- provedení diskretizace modelu
- nadefinování vlastností zvoleného materiálu
- nastavení okrajových podmínek
- nastavení řešiče
- provedení konečného výpočtu

Přesnost konečného výpočtu bývá zásadně ovlivněna vytvořenou sítí. Kvalita sítě primárně závisí na použité metodě při jejím vytváření a na hustotě uzlových bodů a jejich uspořádání. Dalším velmi důležitým faktorem pro vytvoření dobré analýzy je správné nastavení okrajových podmínek. Kombinace všech výše zmíněných požadavků má zásadní vliv na konečné výsledky řešení. Hlavním cílem těchto analýz a jejich řešení je přiblížení se chování reálného tělesa [28] [29].

### 4.1 VLASTNÍ FREKVENCE

Jedná se o vlastnost tělesa nebo soustavy, kdy dochází k přeměně energie potenciální na energii kinetickou a obráceně. V případě vychýlení tělesa z rovnovážné polohy za pomoci externí síly, nastává u tělesa vznik potenciální energie. Po uvolnění se těleso vrací zpět do rovnovážné polohy a při tomto procesu získá kinetickou energii. Následně dochází k překmitu rovnovážné polohy, což vede ke ztrátě kinetické energie a opětovnému získání energie potenciální. Dále lze konstatovat, že se jedná o souhru vlastní frekvence s frekvencí buzení, kdy při vzájemné interakci mezi těmito frekvencemi dochází ke růstu frekvence do nekonečna [30].



Obr. 34 Ukázka vlastní frekvence [30]

Vlastní frekvence je závislá na hmotnosti a tuhosti tělesa, a také na jeho uložení. Skutečné dynamické soustavy disponují celou řadou vlastních frekvencí, které obecně nelze odstranit, ale jen frekvenčně posunout, popřípadě zatlumit. Problém s vlastní frekvencí nastává v okamžiku, kdy dojde při provozu stroje ke shodě s některou z budících frekvencí. Shoda těchto dvou frekvencí se nazývá rezonance, která je pro provoz zařízení značně nebezpečná z důvodu velkého namáhání jednotlivých částí stroje za doprovodu nežádoucích akustických projevů [30].



Každé těleso, stroj nebo soustava disponuje velkým množstvím vlastních frekvencí. Při navrhování stroje je tedy důležité vlastní frekvence umět identifikovat a následně zatlumit tak, aby nedocházelo při chodu strojů ke stavům, kdy dochází k výskytu budící frekvence v blízkosti vlastní frekvence [30].

## 4.2 BUDICÍ FREKVENCE

Znalost budících frekvencí u jednotlivých součástí stroje je zásadní pro identifikaci poškození dané součásti a následného sledování vývoje jejich stavu. Mezi nejčastější identifikovatelná poškození můžeme zařadit [31]:

- Mechanické uvolnění
- Nesouosost
- Nevývahu
- Problémy s ložisky
- Problémy s ozubením
- Porucha statorů a rotorů u elektrických strojů
- Problémy s řetězovými a řemenovými převody

Díky znalosti budící frekvence, můžeme výše zmíněné problémy určit přímo z měřeného signálu, aniž bychom museli nutně odstavit kontrolovaný stroj. Ve většině případech lze určit významnost dané poruchy pro dané zařízení a stanovit její následné odstranění pomocí prediktivní údržby [31].

## 4.3 MODÁLNÍ ANALÝZA

Jedná se o metodu, jejímž úkolem je identifikace modálních vlastností měřeného objektu. Pro konstruktéra může představovat ideální pomůcku při navrhování nových konstrukcí. Dále může být ideální metodou používanou při řešení provozních problémů [29].

Modální analýza může být prováděna jak teoreticky, prostřednictvím metody konečných prvků, tak experimentálně na skutečné součásti. Ideální variantou je kombinace těchto dvou typů modální analýzy. Po provedení měření na skutečné součásti lze blíže specifikovat parametry matematického výpočtu, sloužících k realizaci následujících výpočtů [29].

Při provádění modální analýzy nedochází k přímému definování buzení, ale je nutné o něm mít základní informace. Dá se tedy konstatovat, že na základě této metody lze objevit v konstrukci všechna nebezpečná místa a díky jejich srovnání s budícími frekvencemi následně stanovit, která z těchto frekvencí a míst představují největší hrozbu [28].

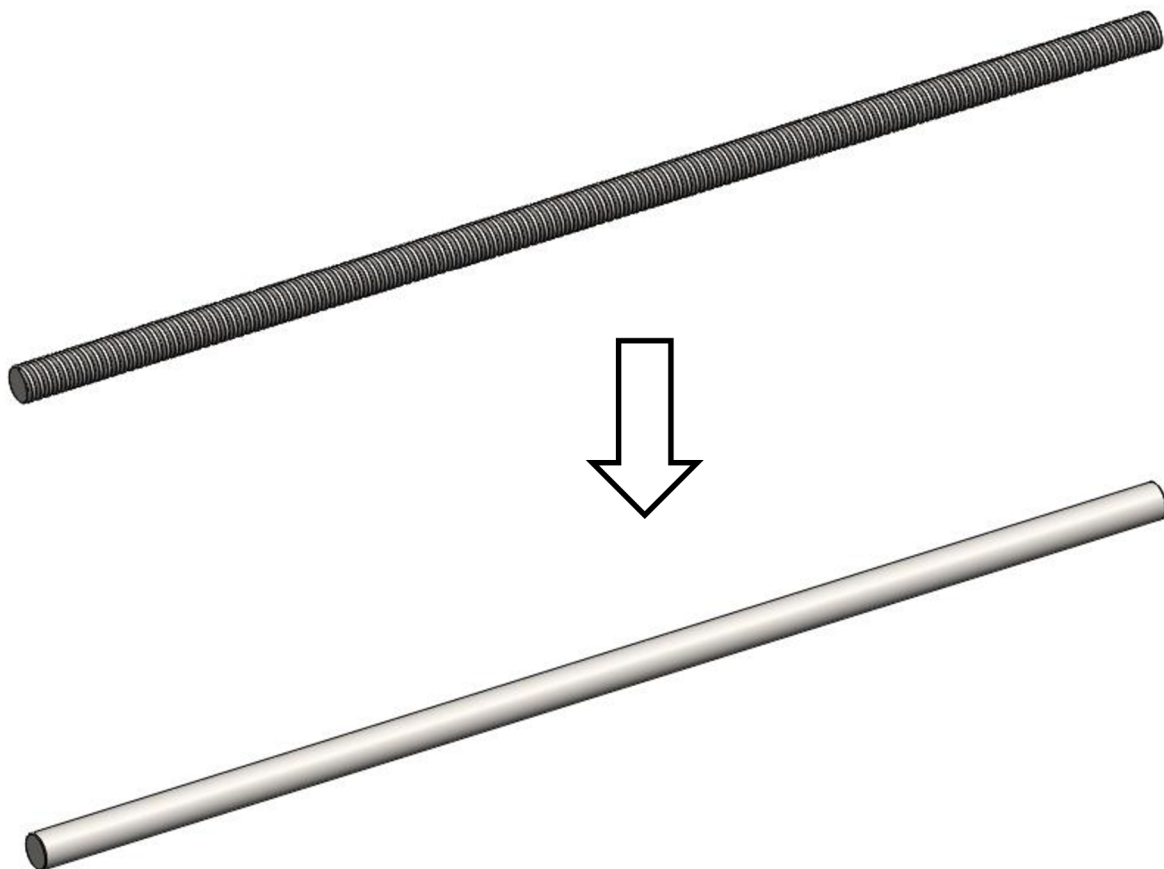
Mezi hlavní výhody použití numerického přístupu pomocí MKP řadíme celkovou rychlost řešení a možnost obsáhnout geometricky komplikovanější a velké modely. Mezi hlavní nevýhody pak patří nutnost znát materiálové vlastnosti a geometrie, které jsou pro získání exaktních výsledků stěžejní. U experimentu je pak potřebná přítomnost fyzického modelu a samotné získávání výsledků bývá zdouhavější a často dochází k nutnosti využití celé řady přístrojového vybavení. Na druhou stranu u experimentu odpadá požadavek na znalost materiálových dat [28].

Navržená navíječka disponuje trapézovou tyčí, pomocí které je zprostředkováván lineární pohyb naváděcího systému drátu. Aby mohla být tyč o délce 270 mm použita, bylo nutné pomocí analýzy ověřit, zda nedojde ke vzniku nežádoucích hodnot vlastní frekvence tyče, což

by mělo negativní účinky na navíjení a bylo by nutné re-designovat koncept navíječky prostřednictvím zkrácení této tyče.

#### 4.3.1 PŘÍPRAVA MODÁLNÍ ANALÝZY TRAPÉZOVÉ TYČE

V přípravné fázi analýzy došlo k úpravě geometrie trapézové tyče za účelem jejího zjednodušení, které nijak zásadně neovlivní konečné výsledky výpočtu. Zjednodušení modelu napomáhá ke snížení časové náročnosti výpočtů a k usnadnění vytváření sítě konečných prvků. Dalším důvodem pro zjednodušení modelu je použití softwaru ANSYS Student, který je omezen na určitý počet uzlů. Bylo vycházeno z modelu trapézové tyče, která byla vytvořena v programu SolidWorks. Ve stejném programu bylo následně provedeno zjednodušení tyče prostřednictvím odebrání šroubovice při zachování průměru 8 mm (obrázek 34). Důsledkem této úpravy geometrie dochází k zásadnímu zkrácení výpočetního času. Trapézová tyč je vyráběna z oceli C45 a její materiálové vlastnosti, které jsou použity v samotné analýze, jsou uvedeny v tabulce 5.



*Obr. 34 Úprava geometrie trapézové tyče*

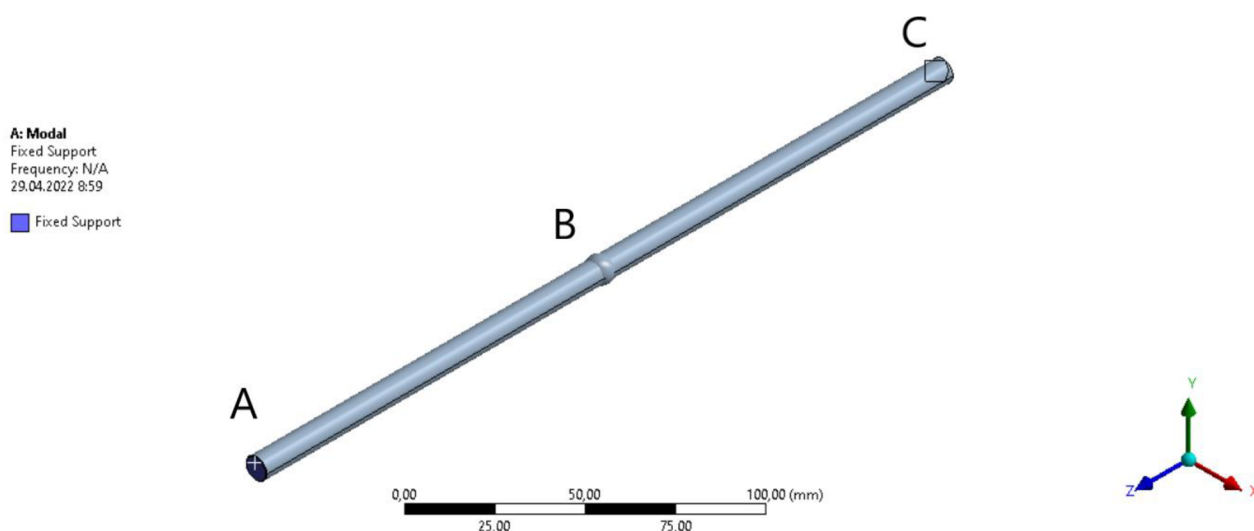
Tab. 5 Materiálové vlastnosti oceli nastavované při analýze

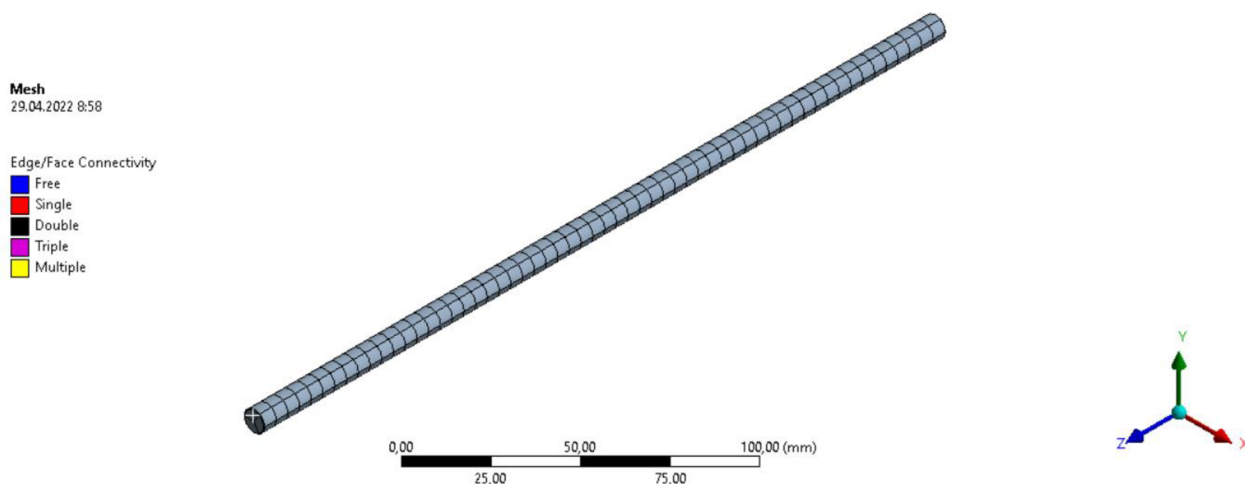
Název	Značení [jednotka]	Hodnota
Mez kluzu	$R_e$ [MPa]	250
Mez pevnosti	$R_m$ [MPa]	460
Hustota	$\rho$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	7850
Youngův modul pružnosti	$E$ [MPa]	200 000
Poissonovo číslo	$\mu$ [-]	0,3

Po provedení zjednodušení byla daná geometrie exportována do ANSYS Workbench, kde bylo zapotřebí řešit nejprve modální analýzu. Při tvorbě této analýzy bylo potřeba nastavit materiál a následně provést síťování zjednodušené geometrie trapézové tyče.

Následně bylo nutné nahradit posuvný naváděcí systém drátu hmotným bodem. Pro tuto analýzu byla velikost hmotného bodu stanovena na 1 kg. Reálná hmotnost posuvného systému působící na trapézovou tyč je nižší, ale z hlediska snahy o naddimenzování konceptu je záměrně uvažována větší. Hmotný bod (pozice B) byl vložen do poloviny prutu, kde je očekáváno nejkritičtější místo. Umístění hmotného bodu je znázorněno na obrázku 35.

Následovalo nastavení okrajových podmínek. Tyč je pevně spojena s krokovým motorem (bod A) a na druhé straně je uložena do ložiska (bod C). Vzhledem k tomu, že samotná rotace v ose X na analýzu nemá významný vliv, bylo v bodech A, C zamezeno všem pohybům (fixní uložení). Samotné nastavení okrajových podmínek je znázorněno na obrázku 35.





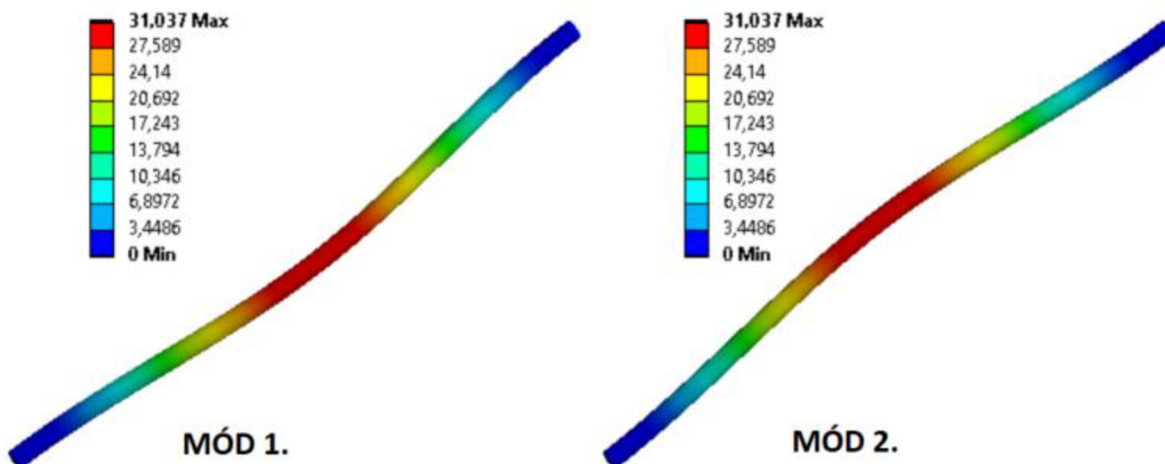
Obr. 35 Okrajové podmínky a hmotný bod

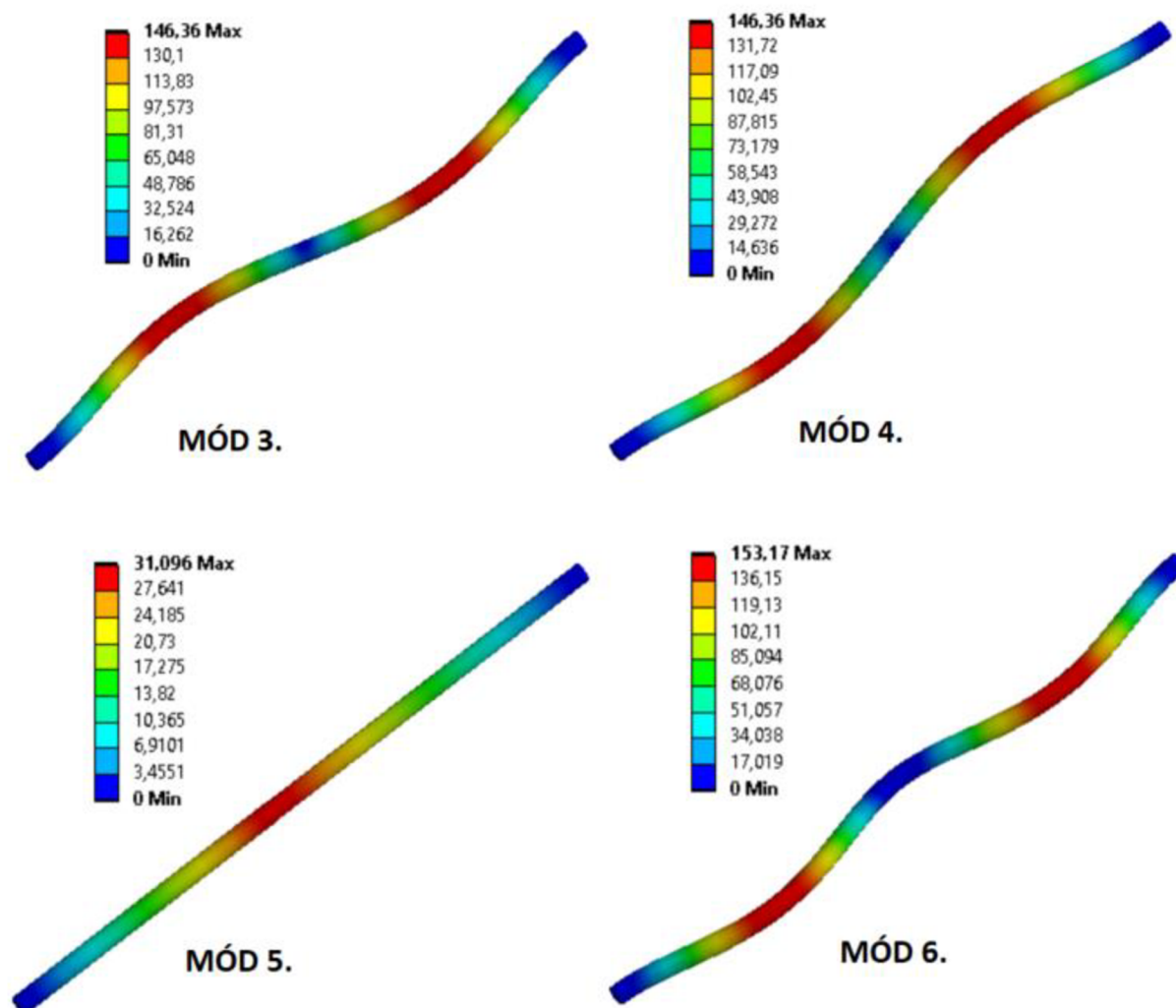
#### 4.3.2 VYHODNOCENÍ MODÁLNÍ ANALÝZY

Byl proveden simulační výpočet pro prvních šest módů, u kterých byla zjištěna vlastní frekvence a celková deformace trapézové tyče. Na základě výsledků této simulace můžeme konstatovat, že ke vzniku nežádoucích stavů dochází při dosažení vlastní frekvence o hodnotě 97,7 Hz. U navržené navíječky je počítáno s maximálními otáčkami 2000  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , což odpovídá zhruba vlastní frekvenci o hodnotě 34 Hz. Na základě této skutečnosti lze tvrdit, že k nežádoucím stavům trapézové tyče při provozu nedojde.

Tab. 6 Vlastní frekvence jednotlivých módů

Mód	Značení	Vlastní frekvence	Mód	Značení	Vlastní frekvence
1.	$f_1$ [Hz]	97,7	4.	$f_4$ [Hz]	1353
2.	$f_2$ [Hz]	97,7	5.	$f_5$ [Hz]	1908,2
3.	$f_3$ [Hz]	1353	6.	$f_6$ [Hz]	1967,7





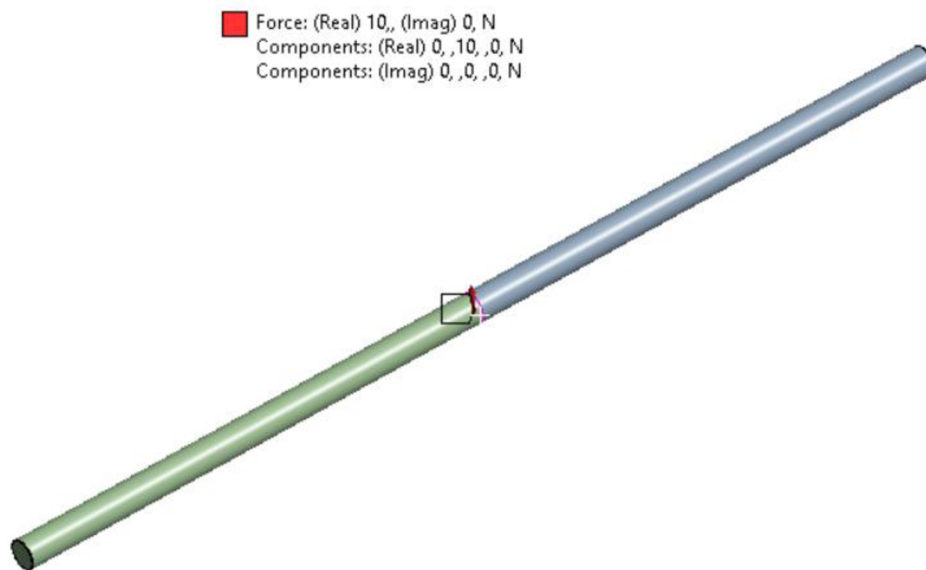
Obr. 36 porovnání vlastních tvarů 1. až 6. módu

#### 4.4 HARMONICKÁ ANALÝZA TRAPÉZOVÉ TYČE

U harmonické analýzy dochází oproti modální analýze k nahrazení volného netlumeného kmitání za vynucené tlumené kmitání. Cílem harmonické analýzy je nasimulování toho, jakým způsobem bude konstrukce reagovat na sinusově se opakující dynamické zatížení. Výskyt tohoto typu zatížení můžeme nacházet ve velkém množství zařízeních, se kterými lze přijít dennodenně do styku. Příkladem takového zařízení může být ventilátor uvnitř laptopu [32]. Při vytváření harmonické analýzy bylo vycházeno z již vytvořené modální analýzy trapézové tyče.

##### 4.4.1 PŘÍPRAVA HARMONICKÉ ANALÝZY

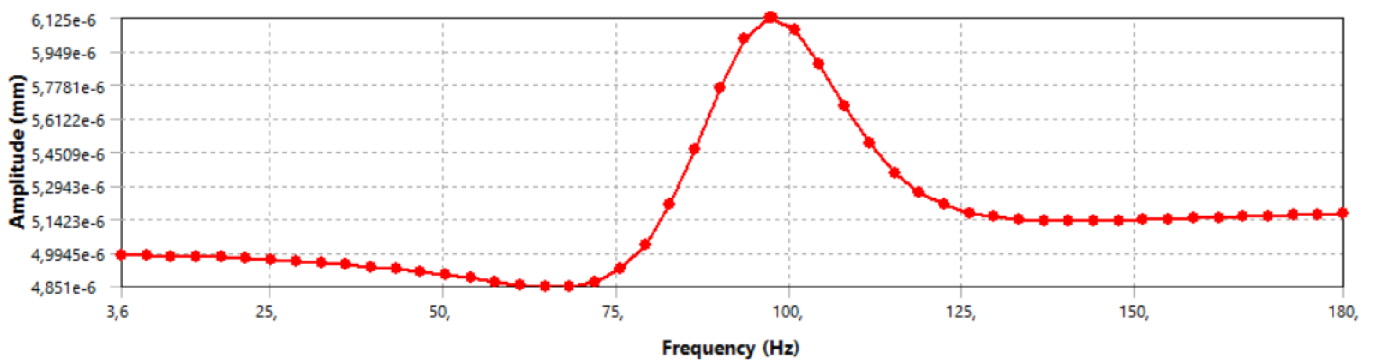
V první fázi této analýzy došlo v ANSYS Workbench vytvoření „Harmonic Response“, které bylo napojeno na již provedenou modální analýzu. Následně došlo k vložení budicí síly o velikosti 10 N (obrázek 37) do střední části trapézové tyče. Tato hodnota byla záměrně volena vyšší, a to z důvodu naddimenzování navíjčky. Okrajové podmínky byly stanoveny již v provedené modální analýze.



Obr. 37 Aplikace budící síly na model

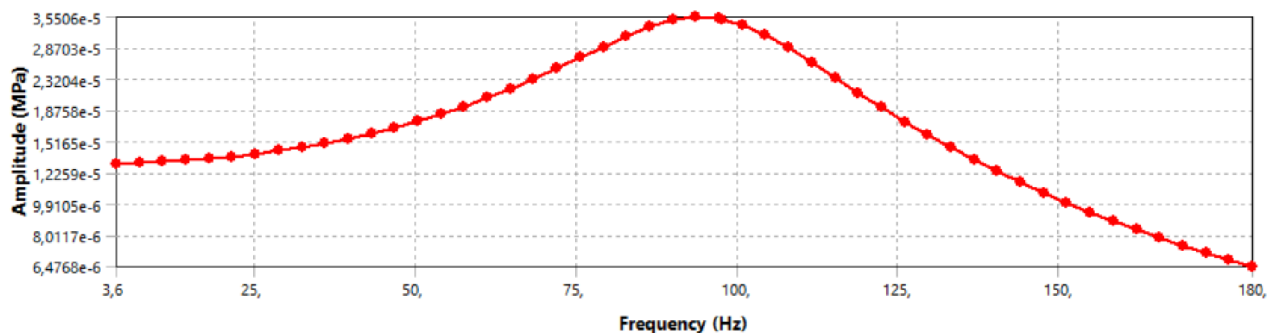
#### 4.4.2 VYHODNOCENÍ HARMONICKÉ ANALÝZY

Při simulačním výpočtu bylo pro zajištění realističtějších výsledků uvažováno tlumení. Na základě výsledků harmonické analýzy lze konstatovat, že k největší deformaci dochází při vlastní frekvenci tyče o hodnotě 97,7 Hz. Na obrázku 38 je vyobrazen graf deformace, z něhož je patrné, že tato deformace je vzhledem k požadavkům navíječky zanedbatelná a nijak zásadně neovlivní její provoz.



Obr. 38 Graf deformace trapézové tyče

Následně byla provedena kontrola napětí v předpokládaném kritickém místě tyče. Výsledky této kontroly jsou vyobrazeny na obrázku 39. Z grafu je patrné, že napětí při vlastní frekvenci nedosahuje nijak zásadních hodnot, které by na provoz navíječky měly negativní vliv.



Obr. 39 Graf napětí trapézové tyče

## 4.5 MODÁLNÍ ANALÝZA KONSTRUKCE NAVÍJEČKY

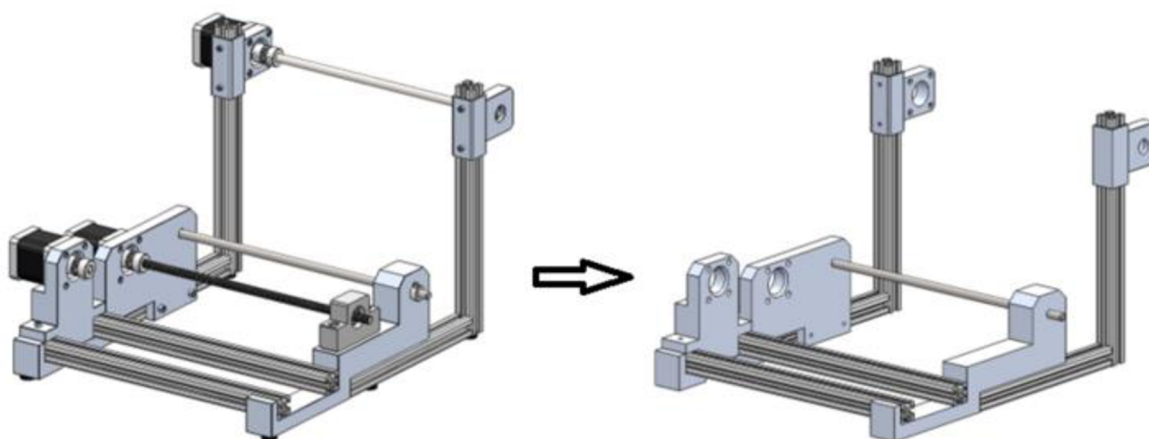
Modální analýza je v případě konstrukce navíječky zásadní při ladění vlastních frekvencí. Výstupem této analýzy jsou pak vlastní tvary a frekvence, na základě kterých, je možné předcházet vzniku rezonancí. U navržené navíječky není předpokládán vznik nežádoucích rezonancí, ale bylo nutné tuto skutečnost podložit právě modální analýzou.

### 4.5.1 PŘÍPRAVA ANALÝZY

Geometrie konstrukce skříně se skládá z několika částí, které jsou k sobě spojeny šrouby M3 a M4. Z důvodu snadnější tvorby sítě a zkrácení výpočtového času, ale také z kvůli omezení licence výpočtového softwaru, bylo nutné zredukovat části navíječky, které nijak zásadně neovlivní výsledky analýzy. Dalším krokem bylo zjednodušení geometrie jednotlivých analyzovaných prvků. Toto zjednodušení spočívalo především v odstranění rádiusů na Al profilech a bočnicích. Provedené úpravy jsou znázorněny na obrázku 40. Pro tuto analýzu byl nastaven materiál, a to slitina hliníku, jejíž materiálové vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 7.

Tab. 7 Materiálové vlastnosti slitiny hliníku nastavované při analýze

Název	Značení [jednotka]	Hodnota
Mez kluzu	$R_e$ [MPa]	195
Mez pevnosti	$R_m$ [Mpa]	215
Hustota	$\rho$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	2700
Youngův modul pružnosti	$E$ [Mpa]	70000
Poissonovo číslo	$\mu$ [-]	0,33



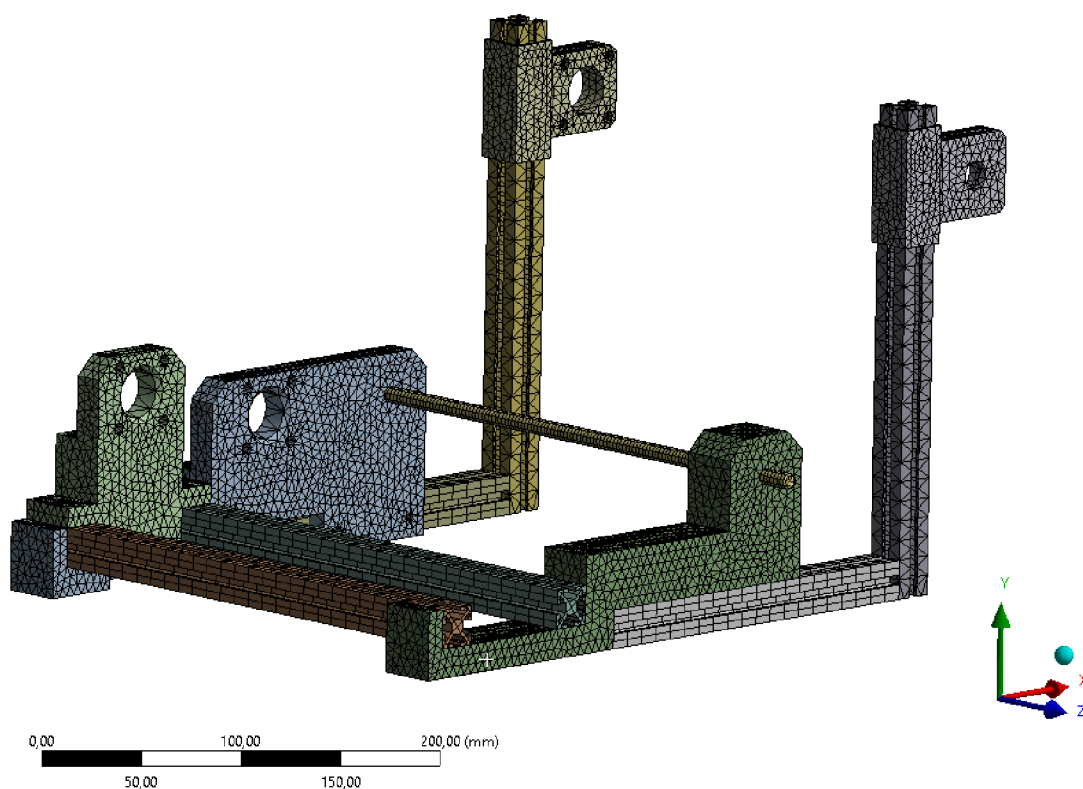
Obr. 40 Úpravy na geometrii konstrukce navíječky

Dalším krokem bylo provedení diskretizace, kde došlo k vygenerování sítě konečných prvků o velikosti elementu 5 mm. Následně byly stanoveny okrajové podmínky, které představují volné umístění navíječky na pracovním stole bez fixního uchycení navíječky. Za tímto účelem byly stanoveny 3 okrajové podmínky:

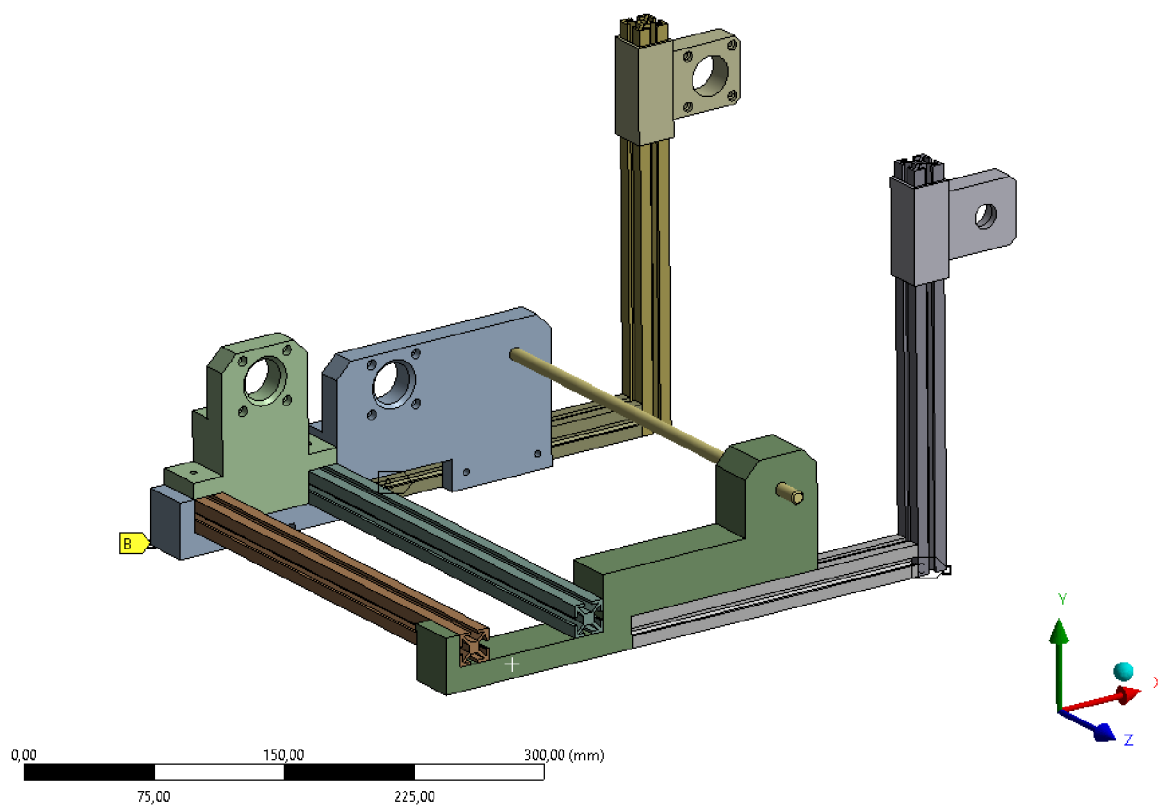
- **Okrajová podmínka A** – byly vybrány plochy navíječky, u kterých je předpokládáný kontakt s pracovním stolem. Pomocí příkazu „displacement“ bylo zamezeno pohybu v ose Y, což má simulovat umístění navíječky na pracovním stole.
- **Okrajová podmínka B** – byl vybrán bod na přední části levé bočnice a pomocí příkazu „displacement“ bylo zamezeno pohybu v ose X a Z
- **Okrajová podmínka C** – byl vybrán bod na pravé bočnici úhlopříčně od bodu pro okrajovou podmínku B, u kterého bylo použitím stejného příkazu zamezeno pohybu v ose X

Diskretizovaný model konstrukce navíječky je znázorněn na obrázku 41 a umístění okrajových podmínek je zobrazeno na obrázku 42.





Obr. 41 Diskretizovaný model konstrukce navijčky



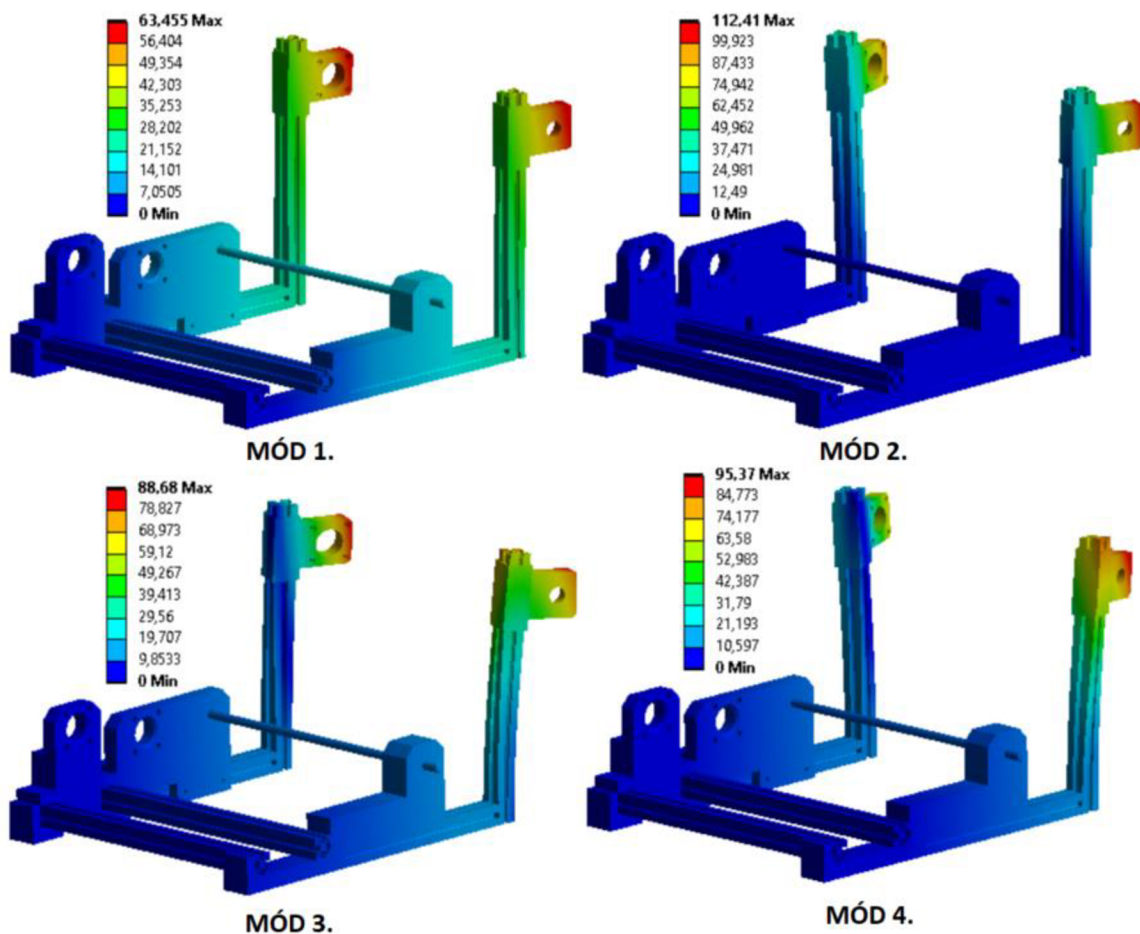
Obr. 42 Okrajové podmínky pro modální analýzu konstrukce navijčky

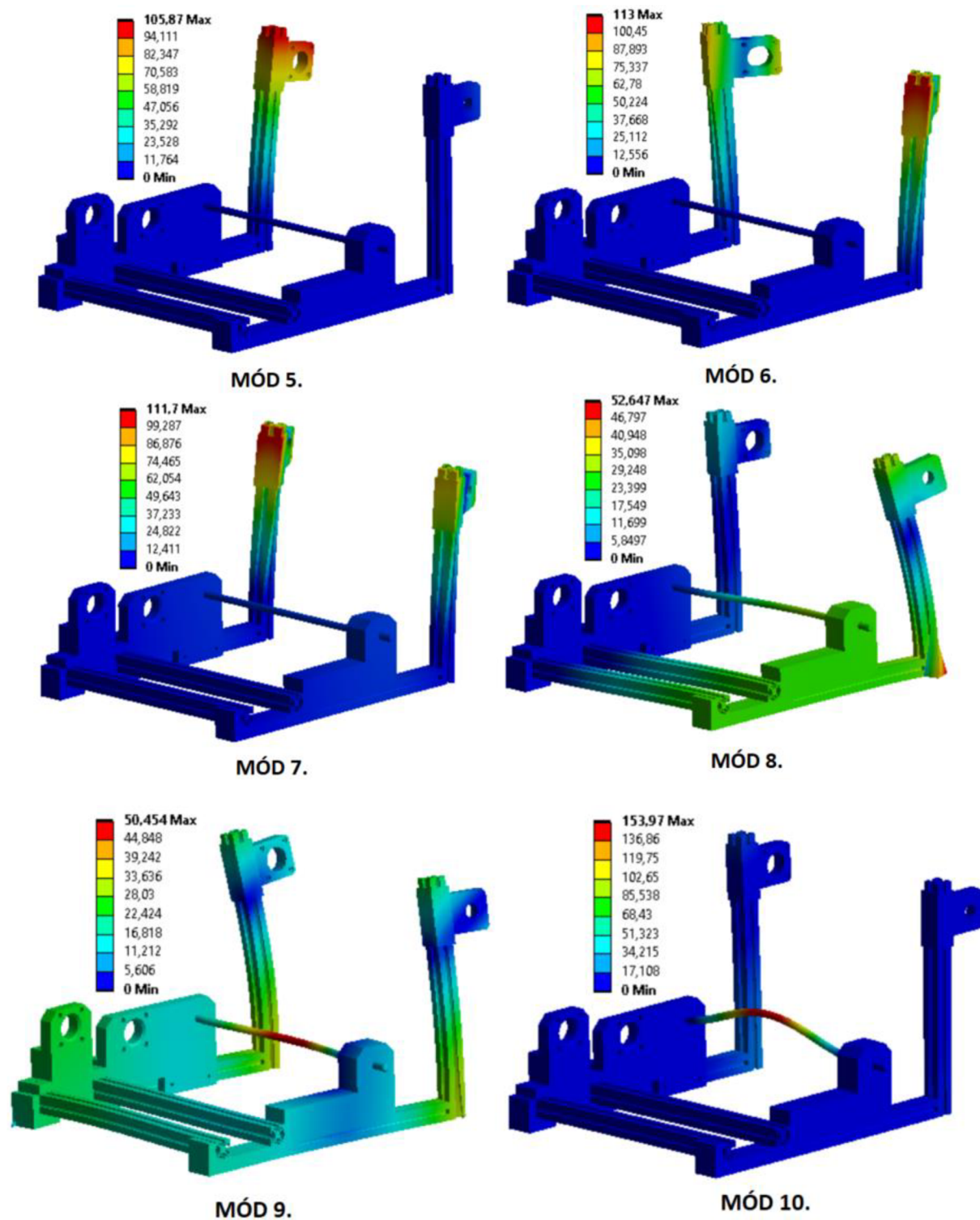
#### 4.5.2 VYHODNOCENÍ ANALÝZ

Byla provedena výpočetní simulace pro prvních deset módů, u kterých byla zjištěna vlastní frekvence a celková deformace konstrukce navijčky. Vlastní frekvenci o nejnižší hodnotě disponuje první mód, kde hodnota  $f_1 = 87,6$  Hz. U ostatních módů vycházely frekvence o vyšších hodnotách. Hodnoty vlastní frekvence všech deseti módů jsou uvedeny v tabulce 8. Celková deformace jednotlivých módů je znázorněna na obrázku 43. Na základě výsledků je patrné, že s každým dalším módem hodnota vlastní frekvence roste. K největší deformaci části konstrukce navijčky pak dochází u desátého módu na hlazené vodící tyči.

Tab. 8 Vlastní frekvence jednotlivých módů

Mód	Značení	Vlastní frekvence	Mód	Značení	Vlastní frekvence
1.	$f_1$ [Hz]	87,6	6.	$f_6$ [Hz]	254,9
2.	$f_2$ [Hz]	125,5	7.	$f_7$ [Hz]	272,5
3.	$f_3$ [Hz]	159,5	8.	$f_8$ [Hz]	324,9
4.	$f_4$ [Hz]	168,4	9.	$f_9$ [Hz]	541,2
5.	$f_5$ [Hz]	174,3	10.	$f_{10}$ [Hz]	574,1





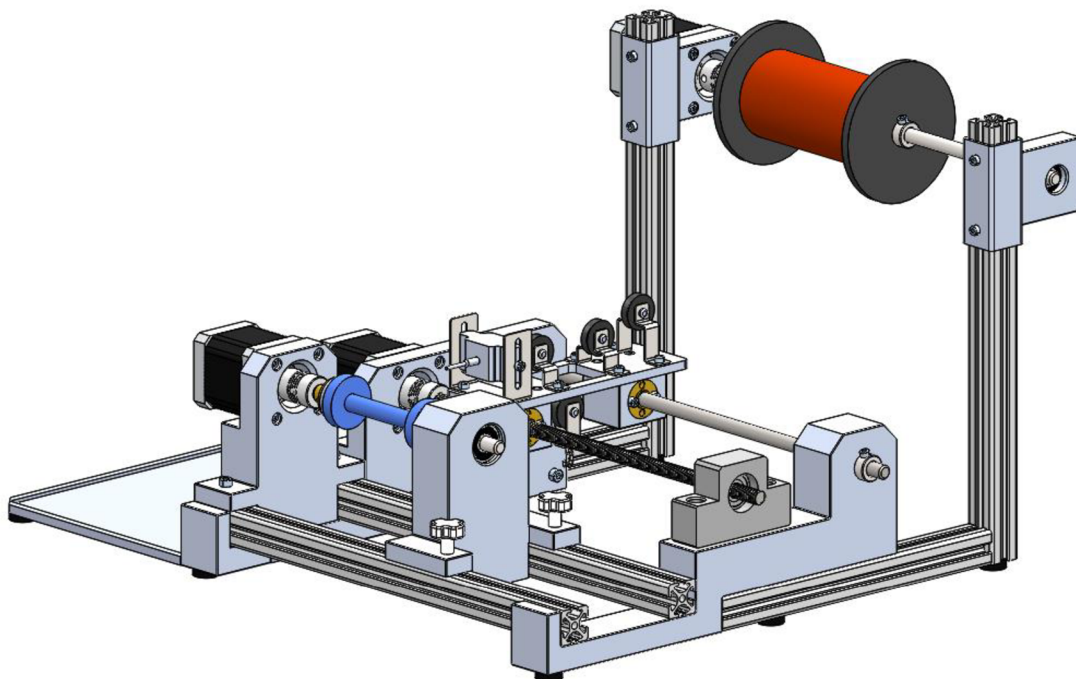
Obr. 43 Porovnání vlastních tvarů 1. až 10. módu

## 5 TECHNICKÉ PARAMETRY NAVÍJEČKY

Na základě vyhodnocení uvažovaných variant jednotlivých částí navíječky, byla navržena navíječka o základních parametrech uvedených v tabulce 9.

*Tab. 9 Technické parametry navržené navíječky*

Parametr	Hodnota
<b>Celkové (obrysově) rozměry</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• délka: 450 mm</li> <li>• šířka: 410 mm</li> <li>• výška: 255 mm</li> </ul>
<b>Počet krokových motorů</b>	3
<b>Maximální otáčky</b>	2000 ot · min <sup>-1</sup>
<b>Průměr navíjeného drátu</b>	0,07 – 0,4 mm
<b>Maximální délka kostry cívky</b>	70 mm
<b>Počet variant uchycení kostry cívky</b>	3
<b>Hmotnost</b>	8 kg



*Obr. 44 Finální podoba navržené konstrukční části navíječky*

## 6 DALŠÍ POSTUP PRACÍ

Jelikož cílem této diplomové práce byl návrh konstrukční části navíječky, nebyla elektronická a softwarová část řešena. Pro uvedení tohoto zařízení do provozu by proto bylo nutné vytvořit nebo zakoupit program řídicí navíječky, respektive její elektronické části. Tato kapitola je proto zaměřena na návržení možných použitelných variant softwarových a elektronických částí jako jsou senzory, snímače, bezpečnostní prvky, řídicí jednotky, které jsou zásadní pro zajištění provozu navržené konstrukční části navíječky. Dále tato kapitola pojednává o možném zakrytování řídicího systému. Jednotlivá zařízení popsaná v této kapitole nejsou finálním návrhem, nýbrž jen možnou variantou. Finalizaci těchto návrhů by bylo nutné konzultovat s danými firmami, které tyto zařízení vyrábějí. Cílem této kapitoly je proto provést zhodnocení navržených komponent a poukázat na jejich výhody a nevýhody.

### 6.1 SYSTÉM ARDUINO

Jedná se o otevřenou elektronickou platformu, založenou na jednoduché počítačové desce (hardware) a vlastním vývojovým prostředím sloužící k tvorbě softwaru. Primárně se jedná o nástroj používající se pro vytváření malých počítačů, jejichž předností je zajištění lepší kontroly nad jednotlivými operacemi ve fyzickém světě.

Použitím tohoto systému lze vytvářet interaktivní objekty. Deska Arduino přijímá informace od celé řady snímačů a senzorů (snímač vzdálenosti, polohy nebo také od klasického tlačítka) a na základě těchto informací následně ovládá širokou škálu různých výstupů (spuštění motoru, rozsvícení LED diody nebo ovládání jiného fyzického výstupu). Pro zajištění požadované funkčnosti Arduino desky je nutné vytvořit program pro Arduino mikrokontrolér, pomocí programovacího jazyku Arduino a Arduino software (IDE), jejichž základ vychází z prostředí Processing.

Výhodou tohoto systému je především jeho jednoduchost. Základní desku lze snadno vyrobit i svépomocí, popřípadě jednotlivé součástky lze pospojovat na kontaktním poli. Mezi základní prvky Arduina řadíme mikrokontrolér, krystal, napájecí zdroj 5 V a převodník sloužící pro zajištění komunikace s počítačem. Na základě požadované funkce jako je například ovládání motorů nebo bezdrátového modulu lze využít široké spektrum takzvaných rozšiřujících desek, které se nazývají Arduino Shildy. V současnosti je jich na trhu nepřehledné množství spolu s převážně volně přístupnou knihovnou pro následné použití.

Software Arduino je k dispozici bezplatně ke stažení a jednotlivé základní desky a jejich příslušenství snadno dostupné jak na online e-shopech, tak i v kamenných prodejnách. Na trhu lze zakoupit jak originální Arduino desky, tak i takzvané klony od dalších výrobců. V případě originálních součástí je garantována funkčnost a spolehlivost dle potřebných certifikátů (CE, FCC, RoHS). Na druhou stranu klony těchto součástí často doprovází problémy se spolehlivostí, zejména se jedná o klony od bezejmenných čínských výrobců [33].

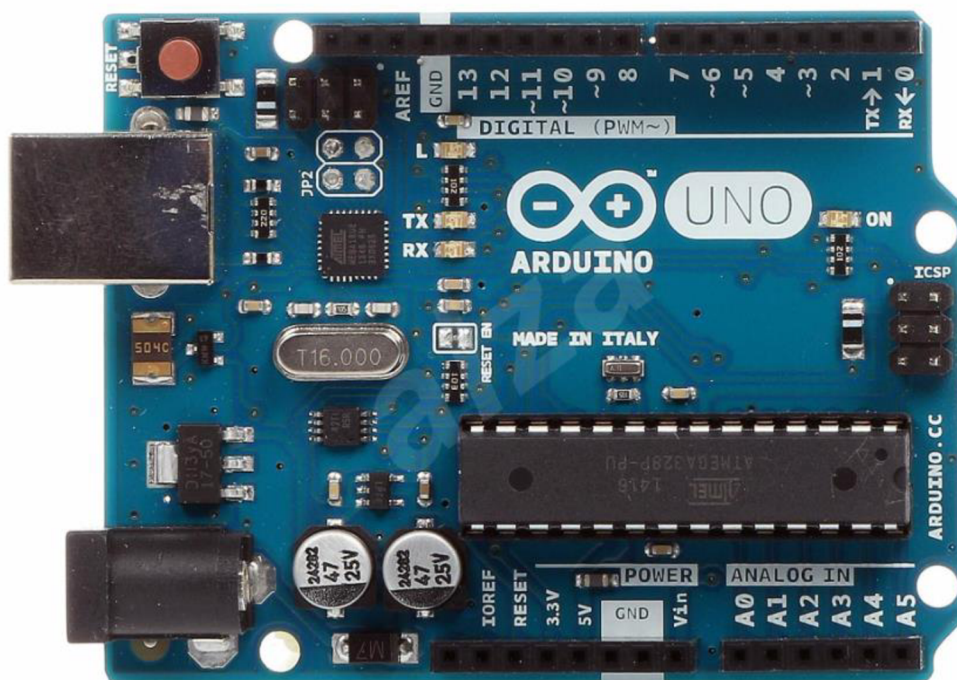
Hlavní důvody pro použití právě systému Arduino [33]:

- Velké množství znalostí, návodů, ověřených postupů, které jsou snadno dostupné na internetu
- Celosvětově rozšířená komunita (v České republice především fórum Arduino.cz)
- Vhodnost pro vytváření prototypů
- Nízkonákladovost

- Multiplatformnost
- Jednoduché programovací prostředí
- Open source a rozšiřitelnost jak softwaru, tak hardwaru

### 6.1.1 ŘÍDICÍ JEDNOTKA

Cílem navržené řídicí jednotky by mělo být zajištění ovládní použitých krokových motorů tak, aby byl jejich provoz co nejlépe synchronizován. Na základě našich požadavků byl vybrán Arduino Shield, konkrétně se jedná o model **Arduino UNO Rev3** (obrázek ???). Jedná se o základní hardwarovou část sloužící pro následné připojení a zprovoznění použitých krokových motorů. Tato deska disponuje mikrokontrolérem AVR Atmega328, 14-ti digitálními a 6-ti analogovými vstupy/výstupy. K této desce je následně nutné připojit jednotlivé motory a jejich ovladače, pro zajištění správného fungování. Dalším krokem by bylo oživení celého zařízení pomocí naprogramování nebo zakoupení programu, který by měl obsahovat hlavně možnost regulace rychlosti otáček při vinutí a poté nastavení synchronizace motoru na daný průměr navíjeného drátu.

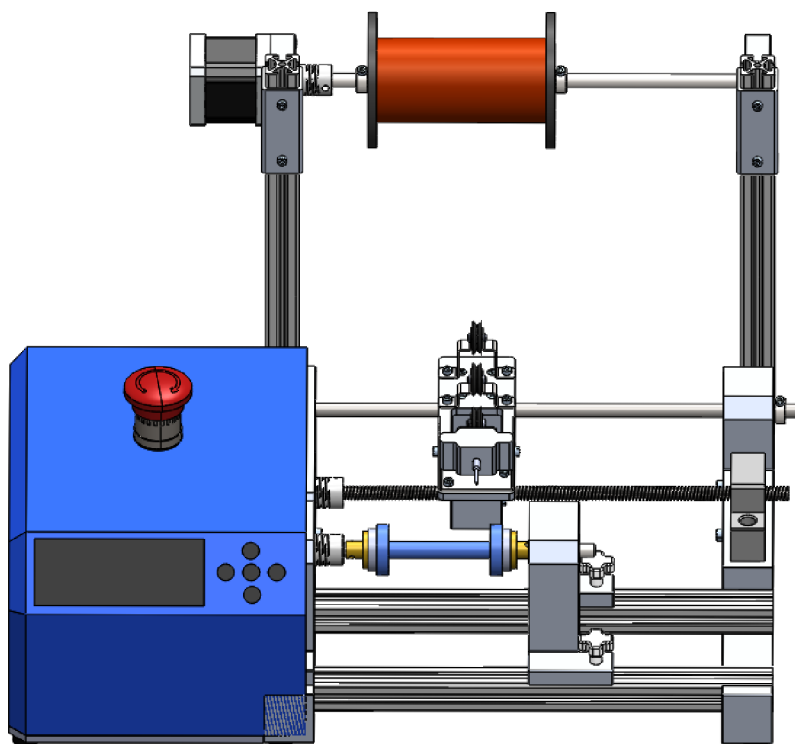


Obr. 45 Arduino UNO Rev3 [34]

Alternativou výše zmíněné Arduino varianty, je zakoupení již kompletního řídicího systému spolu s krokovými motory dle námi zadanými požadavky od výrobce zabývajícího se touto problematikou. Značnou výhodou zakoupení celého systému by byla především jistá záruka funkčnosti, ale pořizovací cena by byla řádově vyšší. V případě, že by byla navíječka v budoucnu používána pravidelněji, než je současně zamýšleno, dalo by se o této alternativě uvažovat.

## 6.2 OPLÁŠŤOVÁNÍ ŘÍDÍCÍ JEDNOTY

Při navrhování opláštění řídicí jednotky je nutné brát v potaz potenciální umístění částí, které do řídicí jednotky vstupují. V tomto případě se jedná především o displej, E-STOP tlačítko a ovládací tlačítka sloužící pro nastavení jednotlivých parametrů. Rozmístění zmíněných prvků lze vidět na obrázku 46. Kryt by byl vyráběn externě z ohýbaného plastu pomocí tepelného zpracování. Tloušťka ohýbaného plastu by byla stanovena až po následné konzultaci s příslušnou firmou zabývající se danou problematikou.



Obr. 46 Návrh zakrytování a rozmístění ovládacích a bezpečnostních prvků

## 6.3 BEZPEČNOSTNÍ TLAČÍTKO

Jedná se o zcela základní bezpečnostní prvek každého průmyslového stroje. Hlavním úkolem tlačítka je v případě jeho stisknutí zahájit tzv. nouzové zastavení, kdy dochází jak k zastavení všech nebezpečných pohybů, tak i k bezpečnému vyřazení všech zdrojů energie. Tvar a funkčnost tlačítka musí být v souladu s normou ČSN EN 60204-1, ze které vychází, že každý stroj musí disponovat alespoň jedním tlačítkem se stop funkcí. Nouzové zastavení musí splňovat následující pravidla [23]:

- Musí být zajištěna snadná viditelnost a přístupnost
- Nebezpečný stav musí být ukončen co nejrychleji, a to bez vzniku dodatečného rizika
- Příkaz „nouzové zastavení“ musí mít přednost před ostatními povely v každém provozním režimu
- Následkem resetu „nouzového zastavení“ nesmí být opětovné spuštění stroje
- Nutnost použití principu přímého stisknutí s mechanickou blokadí

Nouzové tlačítko jako takové, uživatele zařízení nijak nechrání, ale v případě včasného aktivování může velmi významně minimalizovat možné následky nebezpečné situace. Dá se tedy konstatovat, že hlavním parametrem tlačítka je především jeho zažitý vzhled a bezpodmínečná spolehlivost. Standardní tvar tlačítka je podrobně definován normou ČSN EN ISO 13850. V současnosti již existuje celá řada kvalifikovaných výrobců těchto zařízení, tudíž je doporučováno zakoupení kompletní sady i včetně kontaktů [23]. Umístění E-STOP tlačítka (obrázek 46) je voleno tak, aby byla zajištěna jeho snadná dostupnost a viditelnost. Jsou uvažována dvě základní umístění tohoto tlačítka. První varianta umístění je možná vidět na vrchní straně opláštění elektroniky, kde je tlačítko snadno dosažitelné a dobře viditelné. Možnou nevýhodou by mohla být montáž tlačítka do opláštění. Druhou variantou je pak připojení tlačítka k systému a umístění jej separátně vedle navíječky. Nevýhodou této varianty je nekompaktnost navíječky v tom smyslu, že tlačítko není pevně spojeno s navíječkou.



## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zhotovit návrh konstrukční části prototypové lineární stolní navíječky cívek o maximální hmotnosti 15 kg a ploše 1 m<sup>2</sup>.

Za účelem návrhu navíječky bylo nutné provést rešerši, která má pozitivní vliv na lepší představu o samotné funkčnosti navíječky a objasnění významnosti správného a kvalitního vinutí. První část této rešerše byla zaměřena na pojmy, které úzce souvisí s danou problematikou. Především se jedná o vysvětlení pojmu cívka a nastínění její využitelnosti v průmyslu. Dále jsou zde popsány jednotlivé typy cívek. V neposlední řadě jsou zde zmíněny jednotlivé technologie navíjení a jejich zásady. Druhá část této rešerše se zabývá obdobnými typy navíječek, které jsou dostupné napříč trhem. Jsou zde vysvětleny pojmy jako ruční navíječka, polo-automatická a automatická navíječka. Dále jsou zde prezentovány vybrané lineární navíječky od různých výrobců, jejichž základní parametry sloužily jako předloha pro vytvoření navrženého konceptu.

Praktická část se zabývá návrhem konceptu prototypové lineární stolní navíječky, který je zhotoven v 3D programu SolidWorks 2019. Návrh vychází z kritické rešerše obdobných navíječek, která je řešena v druhé kapitole. Hlavními částmi navrženého konceptu je nosná konstrukce, posuvný naváděcí systém drátu, uchycení odvíjené cívky, uchycení navíjené cívky a uchycení krokových motorů. Jako první bylo zvoleno rozmístění jednotlivých částí, poté byla navržena nosná konstrukce složená z nakupovaných hliníkových profilů a externě vyráběných bočnic ze slitiny hliníku 6061. Jednotlivé části této konstrukce jsou mezi sebou spojeny pomocí spojovacích prvků určených pro kompletaci sestav z hliníkových profilů, čímž je zajištěna snadná přestavitelnost celého konceptu.

Další částí konceptu bylo navržení sestavy pro upnutí kostry cívky. Hlavní prvky této sestavy byly navrženy ze slitiny hliníku obdobně jako bočnice. Primární snahou při návrhu této sestavy bylo zajištění vytváření cívek o definovaných rozměrech uvedených v zadání a zároveň umožnit návín na kostry cívek o větších rozměrech, pro případ vzniku možných budoucích požadavků.

Následně byl navržen posuvný naváděcí systém drátu, jehož posun je zprostředkován pomocí trapézové tyče připojené ke krokovému motoru spolu s vodící tyčí. Při návrhu této části navíječky byly uvažovány 3 varianty předepnutí drátu, kdy na základě faktoru „poměr cena/výkon“ byla zvolena varianta 2, ve které je pro předepnutí drátu použita gravitační kladka.

V neposlední řadě bylo nutné konstrukčně vyřešit uchycení odvíjecí cívky. Nejdříve bylo uvažováno nasunutí tohoto zásobníku cívky na fixně uchycenou tyč, kdy odvíjení by probíhalo v důsledku zahájení návínu. Nakonec byl zvolen koncept, kdy nasunutí zásobníku na tyč je fixní (bez možnosti samovolné rotace) a tyč samotná je pomocí spojky připevněna ke krokovému motoru, který zprostředkovává odvíjení drátu ze zásobníku. Důvodem této volby bylo zajištění větší kontroly nad předepnutím drátu po celou dobu navíjení.

Při výběru krokových motorů bylo dbáno především na zajištění synchronizace jednotlivých motorů a také na dosažení variability. Použitím krokových motorů NEMA bylo této variability dosaženo, jelikož v případě budoucí volby krokového motoru o jiném výkonu, je možné použít jiný motor o stejném označení, jelikož jeho základní rozměry příruby zůstanou

totožné. Motory jsou proto umístěny tak, aby v případě změny jejich délky nedocházelo ke kolizi s konstrukcí navíječky.

Jelikož posuvná část navíječky a celkově její konstrukce je z důvodu univerzálnosti rozměrově větší, bylo nutné ověřit, zdali při využití celé délky návínů nebude docházet k nežádoucím stavům, a to především u trapézové tyče. Těto kontroly bylo dosaženo pomocí modální a harmonické analýzy. Na základě těchto analýz bylo zjištěno, že trapézová tyč při navíjení nevykazuje žádné zásadní faktory, které by mohli negativně ovlivnit výsledek navíjení. Následně byla provedena modální analýza konstrukce navíječky, jejíž výsledky potvrdily předpoklad, že konstrukce nebude při provozu nijak negativně deformována.

V poslední části byl nastíněn další postup prací nutný k realizaci celého projektu. Byly zde navrženy elektronické části a software pro ovládání navíječky, následně zde byl navržen bezpečnostní prvek v podobě E-STOP tlačítka. Poté v této části práce bylo nastíněno možné opláštění elektronické části, u kterého bylo uvažováno umístění displeje spolu s ovládacími tlačítky.

Výsledkem práce je koncepční návrh prototypové stolní lineární navíječky, vycházející z konceptů uvedených na trhu. Závěrem práce je použitelnost navíječky jak pro stanovené rozměry navíjených cívek, tak i využití maximálního rozsahu posuvného naváděcího systému drátu. Všechny stanovené cíle byly splněny.

Jelikož se jedná o prototyp, je zde počítáno s dalším zdokonalováním. Budoucí vizí je zefektivnění rámu a nahrazení konstrukčních částí například 3D tiskem, aniž by ale došlo ke snížení kvality celého stroje.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-49-X.
- [2] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0.
- [3] Coil winding technology. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Coil\\_winding\\_technology](https://en.wikipedia.org/wiki/Coil_winding_technology)
- [4] *Základy elektroniky* [online]. Mohelnice: Jozef Diviš [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zel/civky.htm>
- [5] Computer automatic coil winder cheap price. In: *Chinawindingmachine* [online]. Zhongshan WEIDING Machinery Manufacturing Co., ©2022 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.chinawindingmachine.com/transformer-winding-machine/transformer-winder/small-transformer-coil-winding.html>
- [6] WDTX-01thick wire 3mm coil winding machine. In: *Diytrade* [online]. DIYTrade.com, 2022 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: [https://www.diytrade.com/china/pd/13060137/WDTX\\_01thick\\_wire\\_3mm\\_coil\\_winding\\_machine.html#normal\\_img4](https://www.diytrade.com/china/pd/13060137/WDTX_01thick_wire_3mm_coil_winding_machine.html#normal_img4)
- [7] Coil winding machine. In: *Create.arduino* [online]. Creative Commons [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://create.arduino.cc/projecthub/tinkersprojects/coil-winding-machine-cb0d4f>
- [8] HARPER, Bob. Wind It Up. In: *Diyodemag* [online]. DIYODE Magazine, 2017 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: [https://diyodemag.com/projects/wind\\_it\\_up](https://diyodemag.com/projects/wind_it_up)
- [9] Profil 5 20x20. *Alvaris* [online]. Česká republika: ALVÁRIS PROFILE SYSTEMS S.R.O., ©2022 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.alvaris.eu/cz/hlinikovy-konstrukcni-system/profilova-rada-5/profil-5-20x2010>
- [10] Automatic Coil Winder. In: *Theprojectasylum* [online]. The Project Asylum, © 2009-2021 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.theprojectasylum.com/electronicprojects/automaticcoilwinder/automaticcoilwinder.html>
- [11] About-ACME Mechatronics. *Acmemechatronics* [online]. Texas: ACME Mechatronics, ©2020 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://acmemechatronics.com/about-us.html>
- [12] AEH Series Linear Winding Machine. *Acmemechatronics* [online]. San Diego: ACME Mechatronics, ©2020 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://acmemechatronics.com/pdf/AEH-SERIES.pdf>

- [13] 200mm CNC Coil Winder MK6. *Ukcnc* [online]. Cornwall: CNC Design, ©2021-2021 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <http://www.ukcnc.net/index.php/products/200mm-coil-winder/>
- [14] Single spindle versatile coil winding machine WH-751. *Coilwindingmachines* [online]. Ingrid West Machinery, ©2009-2022 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [https://www.coilwindingmachines.eu/linear\\_benchtop\\_winding\\_machines/single\\_spindle\\_coil\\_winding\\_machine\\_wh751.html](https://www.coilwindingmachines.eu/linear_benchtop_winding_machines/single_spindle_coil_winding_machine_wh751.html)
- [15] Mechanical wire tensioners for coil winding. *Coilwindingmachines* [online]. Ingrid West Machinery, ©2009-2022 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [https://www.coilwindingmachines.eu/wire\\_tensioners/mechanical\\_wire\\_tensioners.html](https://www.coilwindingmachines.eu/wire_tensioners/mechanical_wire_tensioners.html)
- [16] Krokové motory. Výhody krokových motorů a jejich nevýhody. *Docplayer* [online]. DocPlayer.cz, ©2022 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/105446759-Krokove-motory-vyhody-krokovych-motoru-a-jejich-nevyhody.html>
- [17] Servomotory. *Conrad* [online]. Česká republika: Conrad Electronic Česká republika, ©2021 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [https://www.conrad.cz/p/joy-it-krokovy-motor-nema-17-01-nema-17-01-04-nm-168-a-prumer-hridele-5-mm-1597325?&vat=true&gclid=Cj0KCQjwxtSSBhDYARIsAEn0thQS0l2m9LuLmrl-HoB2Q-Y4Sy1eLjykSolGuw3Wn3OhBaodSuxNy5IaAjEdEALw\\_wcB](https://www.conrad.cz/p/joy-it-krokovy-motor-nema-17-01-nema-17-01-04-nm-168-a-prumer-hridele-5-mm-1597325?&vat=true&gclid=Cj0KCQjwxtSSBhDYARIsAEn0thQS0l2m9LuLmrl-HoB2Q-Y4Sy1eLjykSolGuw3Wn3OhBaodSuxNy5IaAjEdEALw_wcB)
- [18] Filament FOX ECONOMY PLA černá 1 kg. *3dfoxshop* [online]. 3D FOX shop, ©2022 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [https://www.3dfoxshop.cz/filament-fox-economy-pla-cerna-1-kg/?gclid=CjwKCAjwo8-SBhAlEiwAopc9W8YhxmN7InLXQLPdapvbNxxg7KoPyVwz-9ktSoJPTYC49b2VKV7jY\\_BoCVkIQAvD\\_BwE](https://www.3dfoxshop.cz/filament-fox-economy-pla-cerna-1-kg/?gclid=CjwKCAjwo8-SBhAlEiwAopc9W8YhxmN7InLXQLPdapvbNxxg7KoPyVwz-9ktSoJPTYC49b2VKV7jY_BoCVkIQAvD_BwE)
- [19] Trapézové šrouby. *Bornemann-gewindetechnik* [online]. Německo: Bornemann Gewindetechnik GmbH & Co., ©2022 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.bornemann-gewindetechnik.de/cs/produkty/lichob%c4%9b%c5%ben%c3%adkov%c3%a9-z%c3%a1vity/>
- [20] VOJÁČEK, Antonín. *Nouzové zastavení stroje. Volba a použití tlačítek E-STOP*. Automatizace.hw [online]. Vojáček, 2015 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/bezpecnost-stroju-komponenty/nouzove-zastaveni-stroje-volba-a-pouziti-e-stop-tlacitek.html>
- [21] CHEN, Xiaolin a Yijun LIU. *Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench*. Second edition. Boca Raton: Taylor and Francis ; CRC Press, 2018, xiii, 457 stran : ilustrace (převážně barevné).
- [22] LAWRENCE, Kent L. *ANSYS workbench tutorial: structural & thermal analysis using the ANSYS workbench release 14 environment*. Mission: SDC Publications, 2012, 1 sv. (různé stránkování) : il. ISBN 978-1-58503-754-4.
- [23] Open Coil Winder. In: *Solenoid* [online]. Open Actuator Project, 2021 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z:

- [https://solenoid.or.kr/direct\\_eng.php?address=https%3A%2F%2Fsolenoid.or.kr%2Fopenatuator%2Fopen\\_coil\\_winder\\_eng.htm](https://solenoid.or.kr/direct_eng.php?address=https%3A%2F%2Fsolenoid.or.kr%2Fopenatuator%2Fopen_coil_winder_eng.htm)
- [24] JEONG, Hyunjae. *Coil Winding Machine*. Prague, 2021. Bachelor Thesis. Faculty of Mechanical Engineering CTU in Prague.
- [25] Manual Coil Winding Machine. In: *Ubuy* [online]. Ubuy Co., © 2022 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.ubuy.vn/en/product/SWQ35I-dual-purpose-electric-manual-coil-winding-machine-w-counter-from-u-s-solid>
- [26] Semi Automatic Transformer Winding Machine for HV Coils. In: *Indiamart* [online]. IndiaMART InterMESH, © 1996-2022 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/semi-automatic-transformer-winding-machine-for-hv-coils-11976133973.html>
- [27] Fully automatic hot air coil winding machine. In: *Coilwindingmachines* [online]. Ingrid West Machinery, © 2009-2022 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: [https://www.coilwindingmachines.eu/automatic\\_winding\\_machines/hot\\_air\\_coil\\_winding\\_machine.html](https://www.coilwindingmachines.eu/automatic_winding_machines/hot_air_coil_winding_machine.html)
- [28] PROKOP, Aleš. *Modelování vibrací pohonných jednotek aplikací virtuálních prototypů*. Brno, 2016. Dostupné také z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=137723](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=137723). Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [29] Co to je modální analýza. *Ekosoftware* [online]. WEB7.CZ, 2018 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/co-to-je-modalni-analyza>
- [30] Vlastní frekvence. *Ekosoftware* [online]. WEB7.CZ, 2017 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/vlastni-frekvence>
- [31] Budící frekvence-identifikace závad. *Ekosoftware* [online]. WEB7.CZ, 2016 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/budici-frekvence-identifikace-zavad>
- [32] Topics in Harmonic Response Analysis. *Courses.ansys.com* [online]. ANSYS, © 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/topics-in-harmonic-response-analysis/>
- [33] What is Arduino?. *Arduino.cc* [online]. Arduino, 2018 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [34] Arduino UNO Rev3. In: *Alza.cz* [online]. Alza.cz, © 1994-2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://cdn.alza.cz/ImgW.ashx?fd=f4&cd=ARD204a&i=1.jpg>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\Delta b$	[mm]	Tolerance šířky prostoru vinutí
$\Delta d$	[mm]	Tolerance průměru drátu
$b$	[mm]	Šířka vinutí
$CE$		Conformité Européenne
$d$	[mm]	Drátoměr včetně izolace laku
$E$	[MPa]	Youngův modul pružnosti
$F$	[-]	Faktor plnění
$FCC$		Federal Communications Commission
$h$	[mm]	Výška vinutí
$n$	[ks]	Počet vinutí
$NEMA$		National Electrical Manufacturers
$PA$		Polyamid
$PBT$		Polybutylentereftalát
$PET$		Polyetylentereftalát
$PPS$		Polyfenylsulfid
$R_e$	[MPa]	Mez kluzu
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
$RoHS$		Restriction of Hazardous Substances
$\mu$	[-]	Poissonovo číslo
$\rho$	[ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Hustota

# SEZNAM PŘÍLOH

## PŘÍLOHA 1 - DOKUMENTACE KROKOVÉHO MOTORU

## PŘÍLOHA 1 – DOKUMENTACE KROKOVÉHO MOTORU

JOY-IT

**NEMA17-01**

42STH47-1684A Stepper Motor



The NEMA17-01 stepper motor can be optimally used for tasks in the areas of automation, CNC (f.e. engraving lasers, 3D printers, milling machines, etc.) or robotic.

**KEY FEATURES**

Shaft diameter	5mm (Single shaft)
Specification	42STH47-1684A
Connection	4 jumper cables
Steps per revolution	200
Dimensions	42,3 x 42,3 x 47mm
Scope of delivery	NEMA17-01 Motor

**PERFORMANCE CHARACTERISTICS**

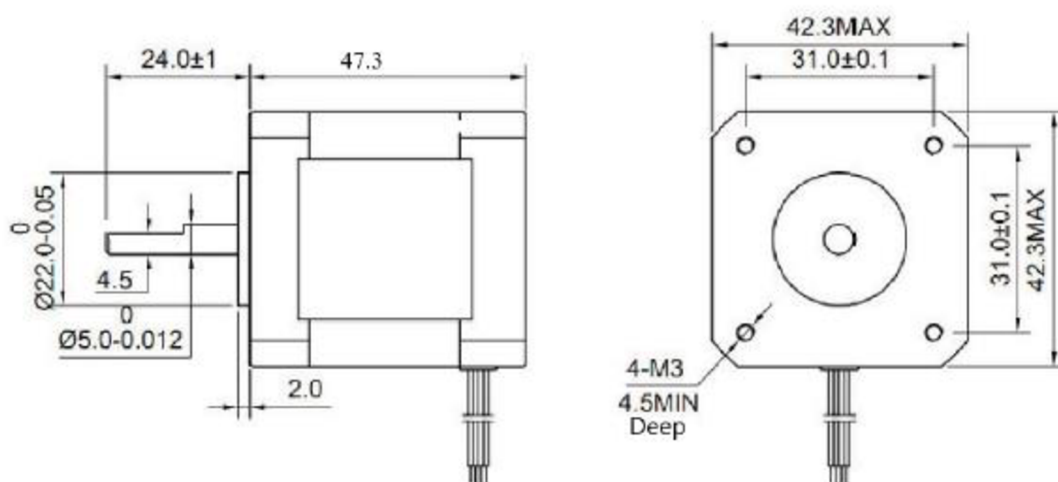
Holding Torque	43.1 Ncm
Rated Voltage	2.8V
Rated Current	1.68A
Step Angle	1.8°
Amount of Phases	2
Temperature Range	-20°C - +50°C
Wiring	Coil 1A: Green Coil 1B: Black Coil 2A: Blue Coil 2B: Red

**ADDITIONAL INFORMATION**

Article No.	NEMA17-01
EAN	4250236815473
Duty No.	8501101090



## SCHEMATIC DIAGRAM



## WIRING DIAGRAM

