



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav přístrojové a řídicí techniky

Návrh CNC stroje pro navíjení elektrotechnických cívek pro vysokootáčkové motory

Bakalářská práce

Autor: Michal Novák

Vedoucí práce: Ing. Lubomír Musálek

Studijní program: B 2341 Strojírenství

Studijní obor: 2612R022 – Informační a automatizační technika

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novák** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **487179**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Informační a automatizační technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh CNC stroje pro navíjení elektrotechnických cívek pro vysokootáčkové motory

Název bakalářské práce anglicky:

Desing of CNC coil winding machine for high speed motors

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou navíjení elektrotechnických cívek a se současnými způsoby jejich produkce v průmyslu.
2. Popište základní součásti navíječky.
3. Navrhněte konkrétních součástí na základě zadaných požadavků
4. Zvolte postup výroby a realizujte navíječku a její řízení

Seznam doporučené literatury:

- [1] KVASNICA, Jozef. Mechanika. Vyd. 2. Praha: Academia, 2004. ISBN 8020012680
[2] ŠTURMA, Martin a Igor LÜFTNER. Správa a provoz ocelových konstrukcí. Praha: Verlag Dashöfer, [2019]. ISBN 978-80-87963-93-7
[3] Richard C. Dorf and Robert H. Bishop: Modern Control Systems, Prentice Hall; 13th ed., 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubomír Musálek ústav přístrojové a řídicí techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **28.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Lubomír Musálek
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Vyhlídal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:

.....
Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Lubomíru Musálkovi za vedení bakalářské práce a za výpomoc při formálních náležitostech práce. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Jiřímu Reslovi mladšímu za odbornou konzultaci v oblasti výrobní technologie. Poděkování patří také společnosti EKOM – VZDUCHOTECHNIKA, s.r.o. za realizaci výroby a lakování některých dílů, jmenovitě panu Jiřímu Reslovi staršímu. A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině za morální a finanční podporu během studia.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá návrhem číslicově řízeného stroje pro navíjení elektrotechnických cívek. Byla provedena obecná rešerše současného stavu řešené problematiky. Byl také proveden průzkum metod a principů navíjení používaných v průmyslu. Na základě zjištěných informací a zadaných vstupních parametrů byl navržen stolní stroj pro lineární navíjení elektrotechnických cívek válcového typu. Závěrem byla ověřena funkčnost stroje a navrženy úpravy, kterými stroj vylepšit do budoucna.

Klíčová slova

CNC, cívka, navíjecí stroj, automatizace, počítačové řízení

Annotation

The bachelor thesis deals with the design of a numerically controlled machine for winding of electrical coils. A general research of the current state of the problem was carried out. A survey of winding methods and principles used in industry was also carried out. On the basis of the information found and the input parameters given, a bench-top machine for linear winding of cylindrical electrical coils was designed. Finally, the functionality of the machine was verified and modifications were suggested to improve the machine for the future.

Keywords

CNC, coil, coil winding machine, automation, computer control

Obsah

1	Úvod	7
2	Aktuální stav řešené problematiky	8
2.1	Cívka	8
2.2	Rozdělení cívek	9
2.3	Technologie navíjení	10
2.3.1	Brzdící mechanismus	10
2.3.2	Vedení drátu	13
2.3.3	Kostra cívky	14
2.4	Metody vinutí	15
2.4.1	Náhodné vinutí	16
2.4.2	Ortocyklické vinutí	17
2.4.3	Šroubovitě vinutí	22
3	Komponenty pohonu navíjecího stroje	23
4	Volba jednotlivých součástí	24
4.1	Požadavky na stroj	24
4.2	Pohon vřetene	24
4.3	Řízení pohonu vřetene	28
4.4	Posuv vedení drátu	29
4.4.1	Lineární posuv	29
4.4.2	Volba pohonu	29
4.5	Řízení pohonu posuvu	32
4.6	Napájení	33
4.7	Uložení rotačních součástí	33
4.8	Kontroler	34
5	Návrh stroje	36

5.1	Konstrukce rámu	36
5.2	Konstrukce brzdícího systému	37
5.3	Konstrukce krycích plechů.....	38
5.4	Konstrukce vřetene.....	38
5.5	Kompletní model stroje.....	39
5.6	Elektrické zapojení.....	Chyba! Záložka není definována.
6	Řízení.....	40
7	Výsledky.....	43
	Závěr	46
	Bibliografie	47
	Seznam obrázků	51
	Seznam tabulek	52

1 Úvod

Výrobu jednoduchých cívek s malým počtem závitů je možné realizovat manuálně. Pokud však nastane potřeba vyrábět přesné cívky z tlustých vodičů a s velkým počtem závitů, není již manuální navíjení vhodné. Problém řeší automatizovaný stroj, který je schopný na základě zadaných parametrů navíjet takové cívky rychle a konzistentně. Komerční stroje pro laboratorní využití však bývají poměrně drahé a jejich výrobou se zabývá pouze několik společností. Z tohoto důvodu nemusí průmyslový navíjecí stroj splňovat veškeré požadavky, které si zákazník stanovil.

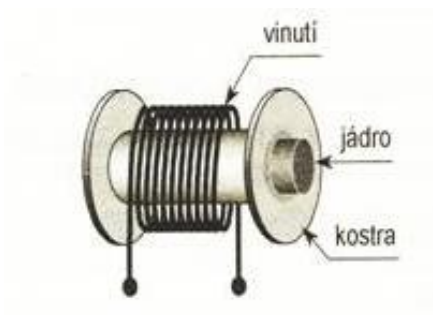
Cílem této bakalářské práce je kompletní návrh stolního stroje určeného k navíjení válcových cívek o zadaných parametrech. Návrh pokrývá mechanickou konstrukci stroje, elektrické zapojení a následně i návrh vlastního řídicího systému. Další částí bakalářské práce by měla být samotná výroba daného stroje a ověření jeho funkcí na různých typech cívek. Výstupem této práce by tedy měl být produkt, který bude schopen navíjet cívky v zadaném rozsahu rozměrů a bude srovnatelný s komerčně vyráběnými modely.

2 Aktuální stav řešené problematiky

2.1 Cívka

Cívka je jednou ze základních součástek používaných v elektrotechnice. Je pasivní, lineární a kmitočtově závislá. Jedná se o geometrickou strukturu sestávající z jednoho nebo více elektricky izolovaných vodičů tvořících smyčky, které při průchodu proudu vytvářejí elektrické pole. Stejně tak je možné detekovat magnetické pole tím, že je měřen rozdíl napětí na koncích vodiče způsobený elektromagnetickou indukcí. Jako vodič se obvykle používá měď, ale specifické aplikace můžou vyžadovat i jiné materiály, jako například hliník, stříbro, či zlato [1]. Základní součásti cívky jsou:

- kostra,
- vinutí,
- jádro.



Obr. 1 - Konstrukce cívky [2]

2.2 Rozdělení cívek

Cívky můžeme rozdělit do několika základních kategorií.

Rozdělení podle tvaru na:

- válcové,
- diskové,
- toroidní.

Válcovými cívkami se rozumí i cívky jiných než kruhových průřezů, např. cívky s obdélníkovým, či trojúhelníkovým průřezem. Stejně tak se mezi cívky válcové řadí i cívky s proměnným průměrem průřezu, jako jsou cívky kónické.



Obr. 2 - Válcová cívka [3]

Obr. 3 - Disková cívka [4]

Obr. 4 - Toroidní cívka [5]

Dále je možné cívky dělit na

- samonosné cívky,
- cívky s kostrou,

nebo na

- cívky s feromagnetickým jádrem,
- cívky bez feromagnetického jádra.

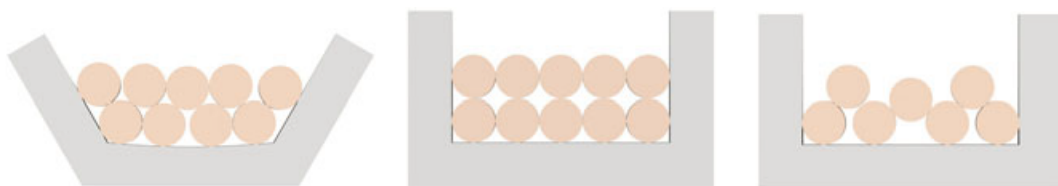
2.3 Technologie navíjení

Výroba elektromagnetických cívek navíjením je technologický proces založený na tváření za studena. Drát je kontinuálně navíjen na kostru cívky při konstantním napnutí drátu. Jednotlivé závity cívky jsou pokládány vedle sebe. Stroj pro navíjení válcových cívek, označovaný jako lineární navíjecí stroj, sestává ze tří hlavních částí:

- vřeteno,
- posuvné vedení pro pokládání drátu po délce cívky,
- brzdící mechanismus pro udržení konstantního napnutí drátu [4].

2.3.1 Brzdící mechanismus

Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících kvalitu navinutí je udržení konstantní tahové síly působící na navíjený drát. Pro dosažení optimálního výsledku je klíčové správně zvolit velikost této síly. Nedostatečná napínací síla drátu vede k nedefinované délce a poloze drátu ve stroji a není tak možné pokládat drát na kostru s potřebnou přesností. Takto nesprávně navinuté cívky mají značný rozptyl délky navinutého drátu mezi jednotlivými kusy, což zapříčiňuje variabilitu v hodnotě elektrického odporu a dalších fyzikálních parametrů. Příliš vysoká napínací síla může způsobit deformaci navíjecí kostry, nebo dokonce přetržení drátu (viz Obr. 5) [4].



Obr. 5 - Důsledky příliš vysoké, optimální a příliš nízké tahové síly [6]

Americká společnost MWS Wire Industries produkující dráty určené speciálně pro užití při výrobě transformátorů a cívek doporučuje minimální a maximální tahovou sílu pro navíjení měděných drátů na základě jejich průřezu.

Tabulka 1 - Doporučená napínací síla [7]

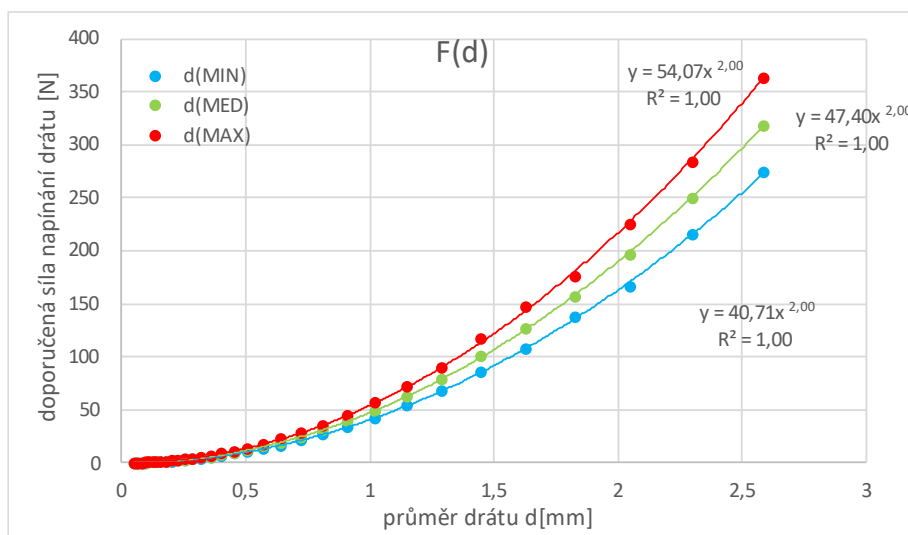
SIZE (AWG)	RECOMMENDED WINDING TENSIONS FOR ROUND COPPER CONDUCTORS			
	COPPER			
	Minimum		Maximum	
	lbs / oz	kg / g	lbs / oz	kg / g
10	61 lbs	28 kg	82 lbs	37 kg
11	48	22	65	29
12	38	17	51	23
13	31	14	41	18
14	24	11	32	15
15	19	8.7	26	12
16	15	6.9	20	9.2
17	12	5.5	16	7.3
18	10	4.3	13	5.8
19	8	3.4	10	4.6
20	6	2.7	8	3.6
21	5	2.2	6	2.9
22	4	1.7	5	2.3
23	3	1.4	4	1.8
24	2	1.1	3	1.4
25	2	0.9	3	1.1
26	1	0.7	2	0.9
27	1	0.5	2	0.7
28	15 oz	425 g	20 oz	565 g
29	12	340	16	455
30	9	270	13	360
31	7	210	10	280
32	6	170	8	290
33	5	135	6	180
34	4	105	5	140
35	3	85	4	110
36	2	65	3	90
37	2	55	3	70
38	2	45	2	55
39	1.2	35	1.5	45
40	0.9	25	1.2	35
41	0.7	20	1.0	28
42	0.6	17	0.8	22
43	0.5	13	0.6	17
44	0.4	10	0.5	13

Tato tabulka se ovšem vztahuje k americkému značení průměru drátu AWG¹, proto byl podle rovnice (1) proveden přepočítání na metrické jednotky a výsledky proložené mocninou funkcí byly vyneseny do přehledného grafu (Graf 1). Z toho je patrné, že navíjecí síla stoupá s druhou mocninou průměru drátu, tedy je lineárně závislá na průřezu drátu, nikoliv na jeho průměru.

$$d_{mm} = 0,127 \cdot 92^{\frac{36-AWG}{39}} \quad (1)$$

d_{mm} – průměr drátu [mm] ; AWG – Americké značení drátů [–]

¹ American Wire Gauge



Graf 1 - Závislost doporučené navíjecí síly na průměru měděného drátu

Brzdící tahovou sílu lze v systému vyvodit mnoha způsoby a volba konkrétního způsobu závisí na mnoha faktorech. Mezi ty hlavní se řadí

- materiál,
- průřez drátu,
- cílová rychlost,
- metoda navíjení.

Pro dráty do průměru zhruba 0,1 mm postačí mechanický odpor vedení drátu strojem, případně se při nedostatečném odporu může použít keramická třecí plocha, přes kterou je drát odvíjen. U větších průměrů lze stroj vybavit mechanickou třecí brzdou s nastavitelným přítlakem. Do takových systémů se často instaluje i pružinový vyrovnávací mechanismus, který je schopný pohltil náhlé změny v napínací síle způsobené např. deformací drátu nebo pomocí koncových spínačů kontrolovat, zda se napínací síla pohybuje v požadovaném rozsahu. V náročnějších aplikacích lze využít elektricky bržděné magnetické kotouče, které jsou schopny svůj odpor vůči otáčení měnit na základě požadavků řídicí jednotky. U velkých průměrů drátů, které se mohou pohybovat i v řádu jednotek mm je poté nutnost použít pneumatické brzdící systémy. Pro orientaci je možné do vzorců získaných z Graf 1 dosadit maximální hodnotu průměru drátu dosažitelnou lineárním navíjením ($d = 5 \text{ mm}$) [4] a zjistit tak potřebnou brzdící sílu.

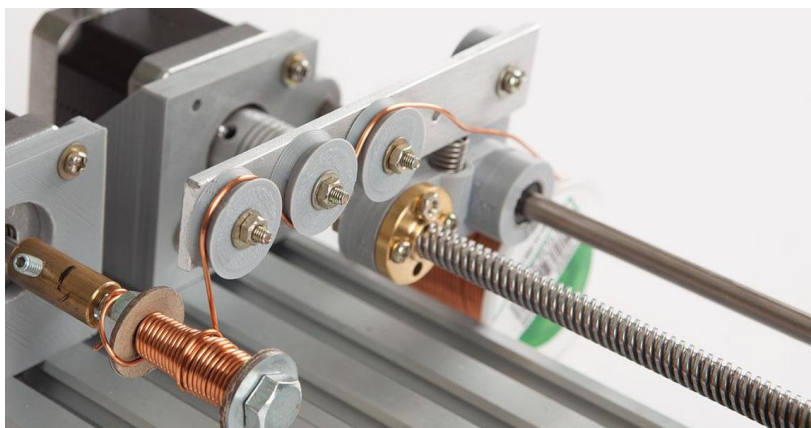
$$F = 4831,61 \cdot 5^2 = 120\,790,25 \text{ N} \quad (2)$$

Odsud je patrná nutnost použití pneumatických brzd u větších průměrů drátů vycházející z mocninné závislosti mezi průměrem drátu a optimální navíjecí silou [4].

2.3.2 Vedení drátu

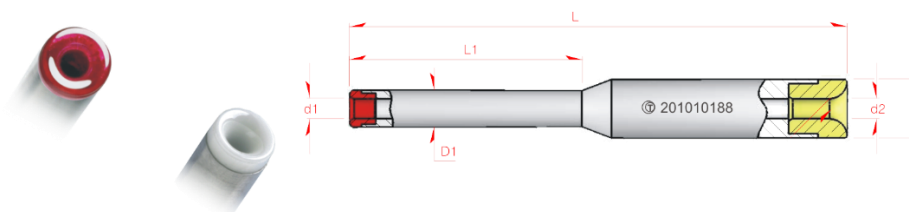
Další součástí lineárního navíjecího stroje, která má velký podíl na výsledné kvalitě navinutí je mechanismus vedení drátu. Tento mechanismus má za úkol vyrovnat deformaci drátu z přívodní špulky a následně jej pokládat na definovanou pozici na kostře. Zde je důležitá synchronizace mezi otáčkami vřetene a posuvem mechanismu vedení, která je zprostředkována řídicím systémem stroje. Podle požadavků na kvalitu navinutí, průměru navíjeného drátu, požadovaných otáčkách vřetene a dalších parametrech lze volit mezi dvěma používanými metodami: kladkové vedení drátu, nebo vedení drátu pomocí tzv. *nozzle wire guide*, speciálního nástroje pro přesné pokládání drátu.

- **Kladkové vedení** je voleno v případě větších průměrů drátu (standardně větších než 0,4 mm), vysokých otáčkách vřetene nebo obecně pro aplikace, kde není precizní navinutí prioritou. Tato metoda využívá faktu, že navíjený drát má tendenci se při dostatečné napínací síle a správné rychlosti posuvu sám rovnat do symetrických smyček. Tato metoda vedení je zároveň výhodná v případě, že chceme navíjet různé průměry drátů na jednom stroji, protože nepotřebuje speciální nástroj pro každý průměr. Z tohoto důvodu je často používána u strojů, které nejsou určeny pro sériovou výrobu [4].



Obr. 6 - Kladkové vedení na navíjecím stroji [8]

- **Nozzle wire guide** je metoda vedení drátu, která je na rozdíl od metody kladkového vedení přesnější z hlediska preciznosti pokládání drátu. Obecně se používá u menších průměrů drátu a nižších navíjecích rychlostí [4]. Kladkový systém je v tomto případě rozšířen o speciální hlavici (*nozzle*), která je upevněna na konci vedení a prochází skrz ni navíjený drát. Za nevýhodu může být považován fakt, že pro každý průměr drátu je potřeba hlavice o jiných rozměrech. V sériové výrobě se však jen zřídka mění průměr drátu na stroji a standardně bývá pro každý průměr používán jiný stroj. V hlavici je vyvrtán otvor, který má větší průměr, než průměr drátu a kvůli snížení třecího opotřebení se na vstup a výstup hlavice umísťuje rubínová nebo keramická vložka.



Obr. 7 - Hlavice s rubínovou špičkou [9]

2.3.3 Kostra cívky

Kostra cívky je klíčovou komponentou určující fyzické rozměry cívky a zároveň plní funkci navíjecího nástroje. V praxi se nejčastěji používají kostry polymerové, konkrétně se nejvíce používají termoplasty jako polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), či polyvinylchlorid (PVC). Pro sériovou výrobu jsou nejpoužívanější kostry vyrobené metodou vstřikování plastu, většinou však bývají dodávány externí

firmou. U volby materiálu kostry je také důležité vzít v úvahu napínací sílu drátu a dle její velikosti volit materiál s dostatečnou pevností, aby se předešlo deformaci kostry a tím nekvalitnímu návínání drátu. Při produkci samonosných cívek se jako nástroj používá nejčastěji kovový váleček, ze kterého je po navinutí cívka sejmuta [10] [11].

Jak již bylo zmíněno v textu výše, kostra plní mimo jiné i funkci navíjecího nástroje, je tedy potřeba přenést rotační pohyb ze vřetene na samotný drát, například pomocí drážky v boku kostry, do které se umístí unašeč.



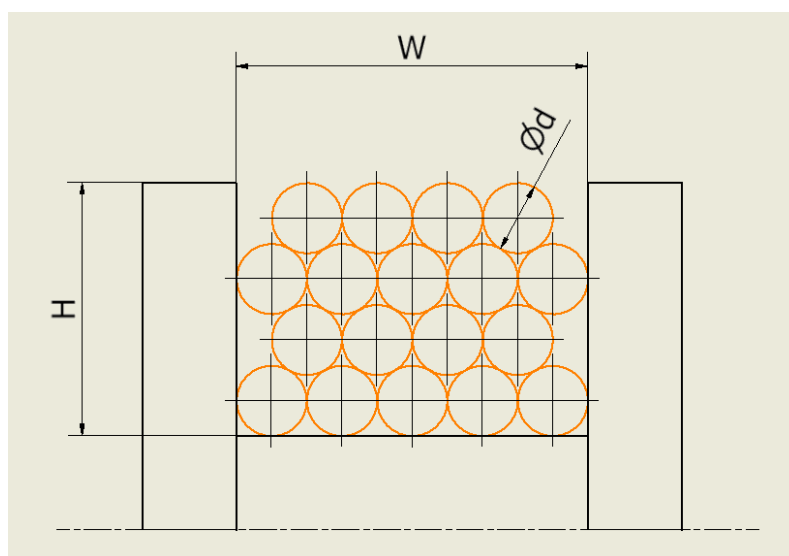
Obr. 8 - Polymerová kostra s drážkou pro unašeč [12]

2.4 Metody vinutí

Při lineárním navíjení cívek je nutné vhodně zvolit metodu navíjení (v anglické literatuře označovanou jako *winding scheme*). Jedná se o způsob kladení drátu na kostru nebo nástroj v případě samonosných cívek. Jako ukazatel kvality navinutí a efektivity navíjecí metody se určuje tzv. *fill factor* označovaný písmenem **k**. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která vyjadřuje vyplnění prostoru cívky navíjeným drátem. Vyjadřuje tedy poměr mezi drátem a vzduchovou mezerou v průřezu cívky. Teoretickou hodnotu **k** lze určit pomocí vzorce (3) [4]:

$$k = \frac{A_{\text{drátu}}}{A_{\text{drážky}}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n \cdot 2}{W \cdot H} \quad (3)$$

k – fill factor [–]; **d** – průměr drátu [mm]; **n** – počet závitů [–];
W – šířka průřezu cívky [mm]; **H** – výška průřezu cívky [mm]



Obr. 9 - Diagram k určení fill factoru

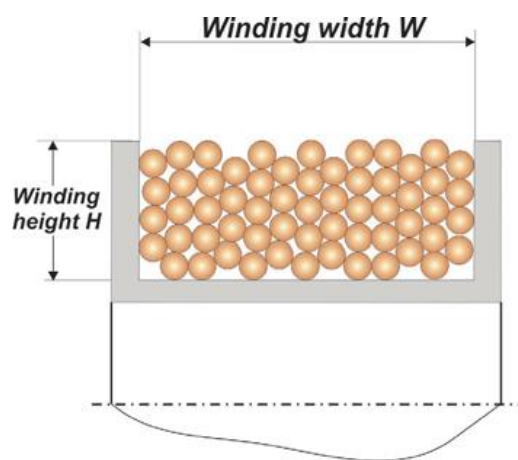
2.4.1 Náhodné vinutí

Nejrozšířenější je metoda tzv. náhodného vinutí (anglicky též *Random winding* nebo *Wild winding*). Jak už název napovídá, drát je na kostru navíjen zdánlivě náhodně. Jednotlivé závity nejsou kladeny jeden vedle druhého, ale jsou pokládány za konstantního posuvu vedení s určitým offsetem, v praxi se používá $1,5 \div 3$ násobek průměru drátu. Offset je zaváděn, aby bylo zamezeno možnému skluzu drátu do nižší vrstvy. Vzhledem k náhodnému pokládání drátu se *fill factor* této metody pohybuje okolo 0,73 (při použití drátu s kruhovým průřezem). Délka navinutého drátu se mezi jednotlivými kusy značně liší a kvůli tomu mají i elektrický odpor a další fyzikální parametry cívky značný rozptyl. Metoda je vhodná pro velkokapacitní výrobu malých cívek s nízkými nároky na kvalitu, jako například cívky pro malá relé, malé transformátory, nebo zapalovací cívky do automobilů. V porovnání s jinými metodami potřebuje mít cívka navinutá metodou náhodného vinutí znatelně větší rozměry pro dosažení srovnatelných fyzikálních parametrů. Vzhledem k nenáročnému řízení posuvu je možné za použití této metody navíjet rychlostí až $30\,000\text{ ot}^{-1}$. Metoda se používá pro obecně nižší průměry drátu do cca 0,5 mm [4].

Vzhledem k absenci jakéhokoli geometrického řádu mezi závity a vrstvami, nelze exaktně určit rozměry cívky po navinutí n závitů. Pro získání orientační hodnoty je však možné použít empirický vzorec:

$$H = d^2 \cdot \frac{n}{W} \quad (4)$$

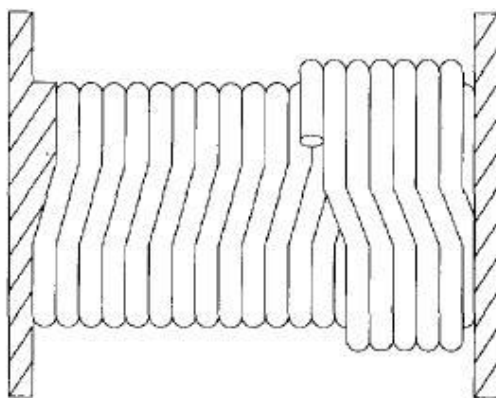
H – výška průřezu cívky [mm]; d – průměr drátu [mm]; n – počet závitů [–];
 W – šířka průřezu cívky [mm]



Obr. 10 - Průřez cívkou vyrobenou metodou náhodného vinutí [13]

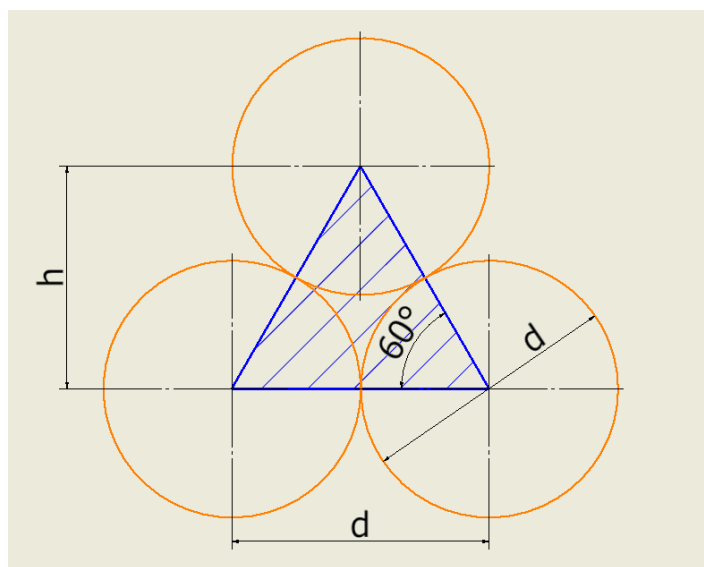
2.4.2 Ortocyklické vinutí

Další možnou variantou je metoda ortocyklického vinutí. Na rozdíl od náhodného vinutí je tato metoda vysoce přesná a prostorově efektivní. Závity vinutí jsou pokládány těsně vedle sebe a ve většině obvodu kostry jsou paralelní s jejími okraji. Výjimkou je přechodová oblast mezi jednotlivými závity, která se nachází na oblasti asi $30^\circ - 60^\circ$ z každého závitu cívky [4].



Obr. 11 - Schéma ortocyklického vinutí s patrnou přechodovou oblastí [14]

Při výrobě vícevrstvých cívek ortocyklickou metodou je každá další vrstva navíjeného drátu kladena do drážek vzniklých v nižší vrstvě. Při použití drátu s kruhovým průřezem je možné určit teoretickou hodnotu *fill factoru* ze znalosti geometrie navinutí. Pokud z ní vyjmeme malou oblast obsahující 3 průchody vodiče v průřezu, je patrné, že spolu tvoří rovnostranný trojúhelník (Obr. 12).



Obr. 12 - Geometrie ortocyklického navíjení

Ze znalosti rovnostranného trojúhelníku je možné určit vzdálenost mezi jednotlivými vrstvami (5).

$$h = \frac{d}{2} \cdot \sqrt{3} \quad (5)$$

Pokud budeme považovat oblast modře šrafovaného trojúhelníku z Obr. 12 jako reprezentativní pro celou plochu průřezu cívky, je možné za použití rovnice (3) určit

teoretickou hodnotu *fill factoru* pro ortocyklické vinutí [4]. Obsah plochy reprezentativního trojúhelníku se určí podle standardního vzorce (6). Obsah vodiče v modrém trojúhelníku se vypočítá jako plocha tří kruhových výsečí o úhlu 60° (7). Pokud spojíme tyto tři vzorce dohromady, získáme žádanou hodnotu **k** (8):

$$A_{\Delta} = \frac{d^2}{4} \sqrt{3} \quad (6)$$

$$A_{vodič} = 3 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{60}{360} \quad (7)$$

$$k = \frac{A_{drátu}}{A_{drážky}} = \frac{A_{vodič}}{A_{\Delta}} = \frac{3 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{60}{360}}{\frac{d^2}{4} \sqrt{3}} = \frac{\pi \cdot \sqrt{3}}{6} \quad (8)$$

$$\approx \mathbf{0,907}$$

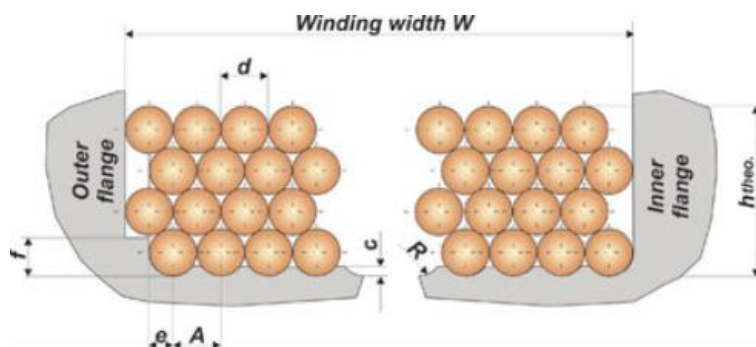
h – výška rovnostranného trojúhelníku [mm] ; ***d*** – průměr drátu [mm] ;

A_Δ – plocha trojúhelníku [mm²] ; ***A_{vodič}*** – Plocha vodiče

Takto vypočtený *fill factor* je však, jak už bylo zmíněno, pouze teoretickou hodnotou. Ta by byla použitelná pouze v případě, že by vodič v každém bodě cívky zaujal ideální polohu. To však v praxi není možné kvůli existenci přechodové oblasti mezi jednotlivými závity, nepřesnosti navíjení, či defektům navíjeného drátu. Zároveň vlivem opačných úhlů náviny přechodové oblasti mezi jednotlivými vrstvami cívky je skutečný průměr navinuté cívky o cca (5-10) % větší, než průměr teoreticky určený.

Pro optimální výsledky se musí rozměry navíjecí kostry odvíjet od požadovaného počtu závitů a fyzických rozměrů drátu. Primárně, šířka prostoru pro drát by měla být násobkem průměru navíjeného drátu. Pro zlepšení přesnosti pokládání první vrstvy je možné kostru vybavit drážkami pro navíjený drát. Podle požadavků na strukturu vinutí je možné použít jedno ze tří schémat uspořádání vrstev [15].

- Stejný počet závitů na vrstvě



Obr. 13 - Uspořádání vrstev pro stejný počet závitů na vrstvě [15]

$$A = d_{MAX}$$

$$e = \frac{A}{2}$$

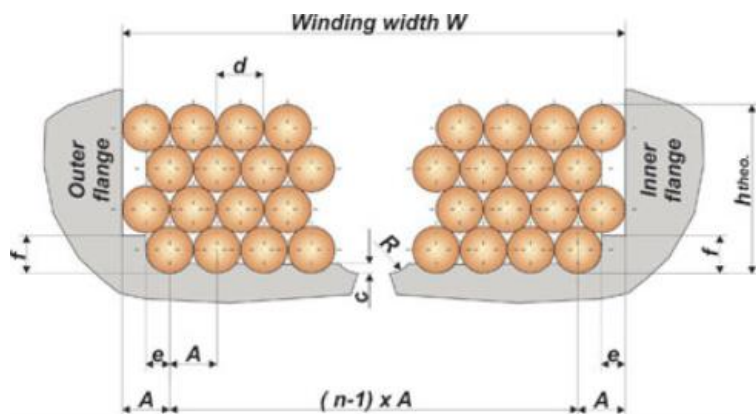
$$c = 0,3 \cdot A$$

$$f = 0,75 \cdot A$$

$$R = \frac{d}{2}$$

$$h_{theo.} = (1 + (w - 1) \cdot \sin(60^\circ)) \cdot d + 10\%$$

- Nerovnoměrný počet závitů na vrstvě s počáteční krátkou vrstvou



Obr. 14 - Uspořádání vrstev pro nerovnoměrný počet závitů na vrstvě s počáteční krátkou vrstvou [15]

$$A = d_{MAX}$$

$$c = 0,3 \cdot A$$

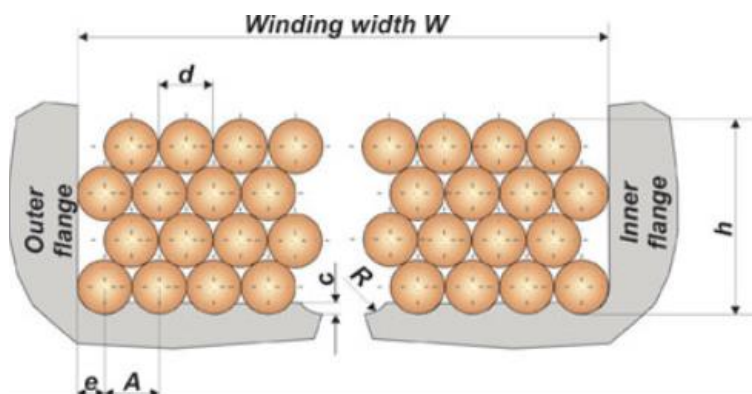
$$e = \frac{A}{2}$$

$$f = 0,75 \cdot A$$

$$R = \frac{d}{2}$$

$$h_{theo.} = (1 + (w - 1) \cdot \sin(60^\circ)) \cdot d + 10\%$$

- Nerovnoměrný počet závitů na vrstvu s počáteční dlouhou vrstvou



Obr. 15 - Uspořádání vrstev pro nerovnoměrný počet závitů na vrstvu s počáteční dlouhou vrstvou [15]

$$A = d_{MAX}$$

$$c = 0,3 \cdot A$$

$$e = \frac{A}{2}$$

$$R = \frac{d}{2}$$

$$h_{theo.} = (1 + (w - 1) \cdot \sin(60^\circ)) \cdot d + 10\%$$

A – závitový krok [mm]; d_{MAX} – maximální průměr drátu [mm];

c – hloubka drážky pro drát [mm]; e – odsazení závitu od stěny [mm];

f – výška zarovnávacího schodu [mm];

R – poloměr drážky pro drát [mm]; $h_{theo.}$ – vypočtená výška navinutí [mm]

Nehledě na zvolené uspořádání má metoda ortocyklického navíjení nejvyšší požadavky na přesnost navíjecího stroje. Nepřesnosti posuvu vedení drátu by neměly překročit $\Delta W = 0,2 \cdot d$ [mm]. Orientačním výpočtem lze určit, že pro drát o průměru 0,2 mm by to znamenalo polohování s přesností minimálně ± 40 μ m.

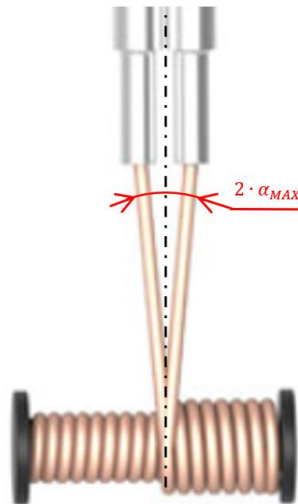
Při vyšších rychlostech navíjení není diskrétní posuv vedení drátu dosažitelný a kvůli stabilitě stroje ani žádoucí. Díky tomu, že závity navíjeného drátu mají tendenci se samy rovnat vedle sebe, je však možné použít spojitý pohyb posuvu. [4] Pro optimální kvalitu navinutí je vhodné udržovat polohu předpokládané pozice drátu na cívce a skutečnou polohu posuvu v určitém rozsahu, jehož hodnotu je možné určit pomocí empirického vzorce (9), který nám udává maximální přípustný úhel α_{MAX} mezi pozicemi,

kde drát vystupuje z vedení a předpokládanou pozicí závitu na cívce. Pro ortocyklické vinutí je doporučen bezpečnostní součinitel 0,4 [16].

$$\alpha_{MAX} = 51,52 \cdot (D_{kostry})^{-0,41} + 11,31 \cdot (D_{kostry})^{-0,33} \cdot \ln d \quad (9)$$

α_{MAX} – úhel navíjeného drátu [°] ; D_{kostry} – průměr kostry [mm] ;

d – průměr drátu [mm]



Obr. 16 – Diagram kladného (vlevo) a záporného (vpravo) α_{MAX} [17]

2.4.3 Šroubovité vinutí

Metoda šroubovitého vinutí je v mnoha aspektech podobná ortocyklické metodě. Na rozdíl od ní má však navíjený drát konstantní stoupání a v žádném bodě není paralelní s okrajem cívky. V případě, že by tato metoda byla využita pro navinutí vícevrstvé cívky, by nebylo možné zajistit, aby navíjená vrstva “zapadávala“ do vrstvy nižší. Z tohoto důvodu se metoda využívá primárně pro navíjení jednovrstvých cívek.

3 Komponenty pohonu navíjecího stroje

Vhodný pohon je jednou z nejdůležitějších komponent navíjecího stroje. Od zvoleného pohonu se odvíjí přesnost polohování, minimální a maximální průměr navíjeného drátu i rychlost navíjení. Možností, ze kterých volit je mnoho, proto byly vybrány 4 hlavní kategorie jako možnosti pro pohon stroje:

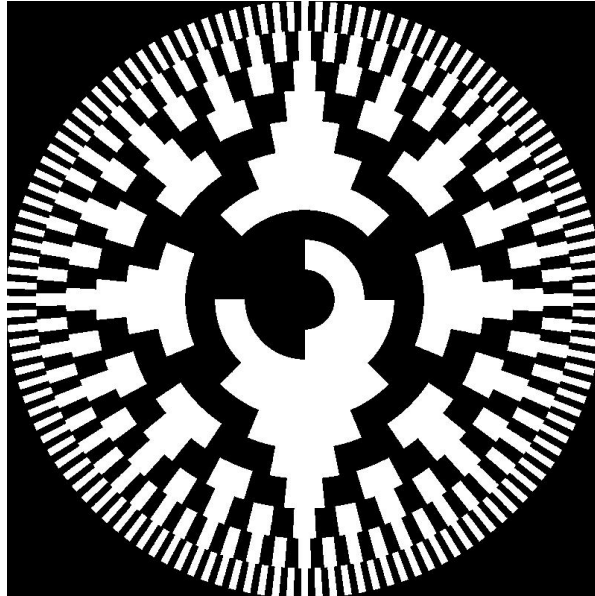
- kartáčový stejnosměrný motor,
- bezkartáčový stejnosměrný motor,
- krokový motor,
- servomotor.

Pro účely navíjecího stroje je důležité řízení polohy zvoleného pohonu. Existují dva základní principy řízení

- **Řízení s otevřenou smyčkou**, označované také jako nezpětnovazební řízení, pracuje zcela na základě vstupního signálu, tudíž požadovaná poloha a skutečná poloha motoru se nemusí shodovat.
- **Řízení s uzavřenou smyčkou**, označované také jako zpětnovazební řízení, porovnává požadovanou polohu se skutečnou polohou motoru, kterou vyhodnocuje formou zpětné vazby a provádí požadovaný zásah.

U řízení s uzavřenou smyčkou se nabízí použití rotačního enkodéru pro určení úhlu natočení motoru. Existují dva základní typy rotačních enkodérů.

- **Inkrementální enkodér** udává informaci o poloze motoru počtem impulzů v kladném, nebo záporném směru. Je tedy možné určit pouze polohu relativní vůči startu odměřování. Zdrojem impulzů bývá např. fotodioda, na kterou dopadá paprsek zářící skrz průhledné štěrby ve skleněném kotouči, který je spojen s hřídelí pohonu.
- **Absolutní enkodér** udává, na rozdíl od inkrementálního enkodéru, informaci o absolutní hodnotě natočení hřídele. V případě optické varianty bývá zdrojem informace opět průhledný kotouč spojený s hřídelí, ovšem pro absolutní určení polohy je nutné, aby měl každý inkrement polohy unikátní identifikátor. V praxi se používá Grayův kód, aby bylo možné odhalit chybu v odměřování. (sousední hodnoty se liší pouze o jeden bit).



Obr. 17 - Příklad 9bitového Grayova kódu umístěného po obvodu kotouče [18]

4 Volba jednotlivých součástí

4.1 Požadavky na stroj

- schopnost navíjet cívky o průměru až $D_{MAX} = 50 \text{ mm}$
- minimální průměr navíjeného drátu $d_{MIN} = 0,2 \text{ mm}$
- maximální průměr navíjeného drátu $d_{MAX} = 1,5 \text{ mm}$
- délka cívky do $W_{MAX} = 150 \text{ mm}$

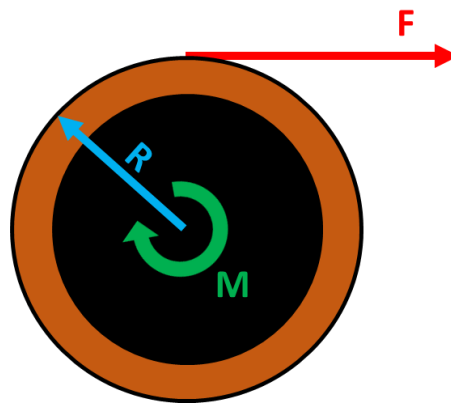
4.2 Pohon vřetene

Pro pohon vřetene je důležité zvolit pohon s dostatečným točivým momentem, aby byl motor schopen vyvinout odpovídající napínací sílu. Využitím závislosti napínací síly na průměru navíjeného drátu (10) získané z grafu (Graf 1) byla určena požadovaná napínací síla pro maximální průměr drátu d_{MAX} , který je definován v požadavcích (4.1).

$$F_{MAX} = 47,4 \cdot d_{MAX}^2 = 47,4 \cdot 1,5^2 = 106,65 \text{ N} \quad (10)$$

Točivý moment M_{MAX} potřebný pro vyvinutí napínací síly F_{MAX} při navíjení cívky o průměru D_{MAX} lze tedy určit dle rovnice (11).

$$\begin{aligned} M_{MAX} &= F_{MAX} \cdot R_{MAX} = F_{MAX} \cdot \frac{D_{MAX}}{2} = 106,65 \cdot \frac{0,05}{2} \\ &\approx 2,67 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (11)$$



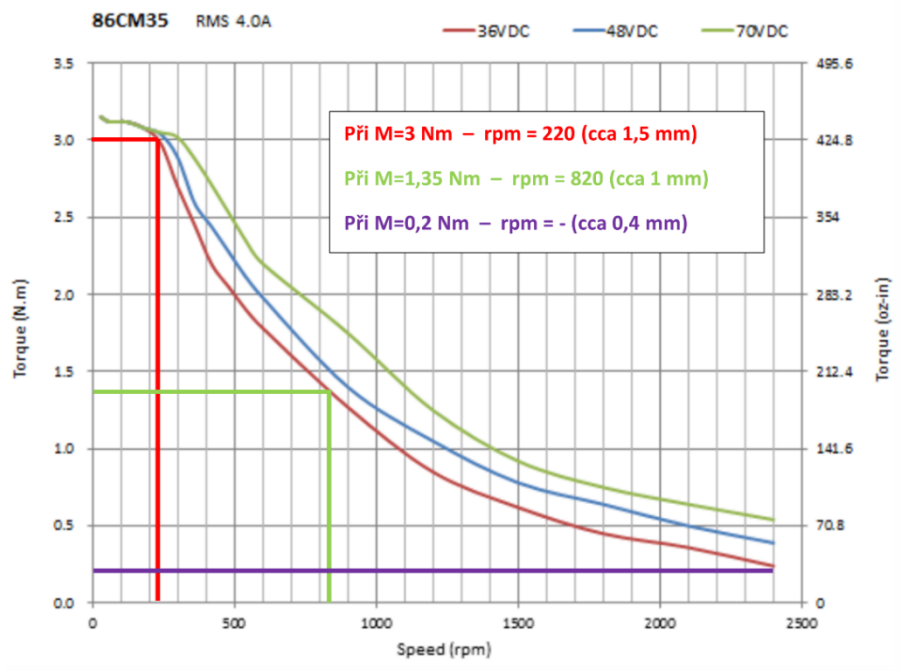
Obr. 18 - Moment M potřebný pro vyvinutí napínací síly F

Aby byl motor schopný překonat rozběhové tření brzdícího mechanismu, bylo nutné volit motor s vyšším točivým momentem, než který byl vypočten výše pomocí vztahu (11). Na základě vypočtených parametrů byl zvolen dvoufázový krokový motor 86CM35 od výrobce Leadshine Technology Co. Ltd, který je schopný vyvinout točivý moment až $3,5 \text{ N} \cdot \text{m}$.



Obr. 19 - 86CM35 – krokový 2fázový motor 3,5 N.m [19]

Z grafu (Graf 2) dostupného na webu prodejce je možné určit maximální otáčky navíjení pro každý točivý moment. Do grafu byly vyneseny točivé momenty potřebné pro navíjení drátů o průměru 1,5 mm, 1 mm a 0,4 mm. Z grafu je patrné, že při napájecím napětí $U = 36 V$ a průměru navíjeného drátu $d = d_{MAX} = 1,5 mm$ je možné dosáhnout navíjecích otáček 220 ot^{-1} . Tyto otáčky jsou vzhledem k velikosti napínací síly přijatelné. Při navíjení drátů o průměru menším než $d = 0,4 mm$ již nejsou navíjecí otáčky limitovány výkonem motoru.



Graf 2 - Závislost točivého momentu na otáčkách motoru 86CM35 [20]

Tabulka 2 - Parametry 2-fázového motoru 86CM35

Typ příruby	NEMA34
Úhel kroku	1,8°
Točivý moment [N.m]	3,5
Elektrický proud [A]	4
Elektrický odpor vinutí [Ω]	0,42 \pm 10%
Indukčnost [mH]	2,67 \pm 20%
Moment setrvačnosti [kg.cm²]	1
Hmotnost [kg]	1,8
Rozměry hřídele [mm]	Ø12,7 x 32

4.3 Řízení pohonu vřetene

Výrobce krokového motoru zvoleného v předchozí kapitole (4.2) doporučuje pro řízení motoru použít krokový driver EM882S, který je pro provoz daného motoru určený. Z toho důvodu bylo doporučení výrobce dodrženo. Tento driver je schopný řídit motor v režimu celých kroků (200 poloh na jednu otáčku motoru), nebo v režimu mikrokrokování, při kterém je schopný rozdělit jeden krok motoru až do 256 mezikroků a celkem tedy docílit maximálně 51 200 možných poloh na jednu otáčku motoru.



Obr. 20 - Driver krokových motorů EM882S [21]

Tabulka 3 - Parametry krokového driveru EM882S

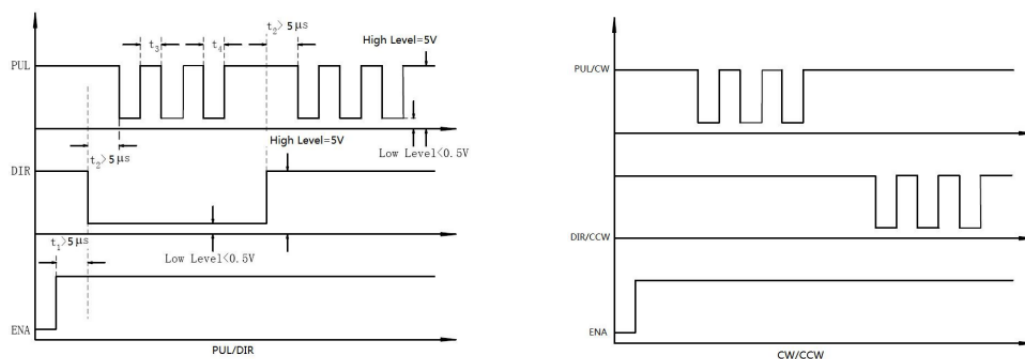
Napájecí napětí [V]	20 – 80
Špičkový proud [A]	0,5 – 8,2
Max. výstupní frekvence [kHz]	200

Driver má 6 opticky oddělených vstupů, které se ovládají pomocí 5V logiky.

- PUL/CW+
- PUL/CW-
- DIR/CCW+
- DIR/CCW-
- ENA+
- ENA-

Driver nabízí dva módy ovládání:

- užitím směrového impulsu DIR a krokového impulsu PUL,
- užitím krokových impulsů CW a CCW².



Graf 3 - Časový diagram pro vstupy driveru EM882S [22]

4.4 Posuv vedení drátu

4.4.1 Lineární posuv

Pro převod rotačního pohybu motoru na lineární posuv vedení drátu byl zvolen trapézový válcovaný šroub TR12x3 s rozměrovou toleranční třídou 7e o délce 400 mm v kombinaci s bronzovou přírubovou maticí.

Pro zajištění stability, linearity a celkové přesnosti posuvu byl stroj vybaven lineárním pojezdem skládajícím se ze dvou vodících tyčí SK16 o průměru 16 mm a dvou lineárních kuličkových ložisek SMA16L.

4.4.2 Volba pohonu

Klíčovým faktorem při volbě pohonu posuvu byla výsledná přesnost polohování. Minimální přesnost polohování posuvu pro $d_{MIN} = 0,2 \text{ mm}$ byla v kapitole (2.4.2) určena pomocí vzorce (12).

² CW – krokový impuls po směru hodinových ručiček
CCW – krokový impuls proti směru hodinových ručiček

$$\Delta W = 0,2 \cdot d = 0,2 \cdot d_{MIN} = 0,2 \cdot 0,2 = 40 \mu m \quad (12)$$

ΔW – Minimální přesnost pokládání drátu [mm] ;

d – průměr navíjeného drátu [mm]

Vzhledem ke stoupání zvolené závitové tyče TR12x3 je nutné zvolit takovou kombinaci pohonu a jeho řízení, aby bylo možné dosáhnout alespoň 75 kroků (13) na jednu otáčku motoru.

$$steps_{min} = \frac{P}{\Delta W} = \frac{3}{0,04} = 75 \quad (13)$$

$steps_{min}$ – minimální počet kroků na otáčku posuvu [–] ;

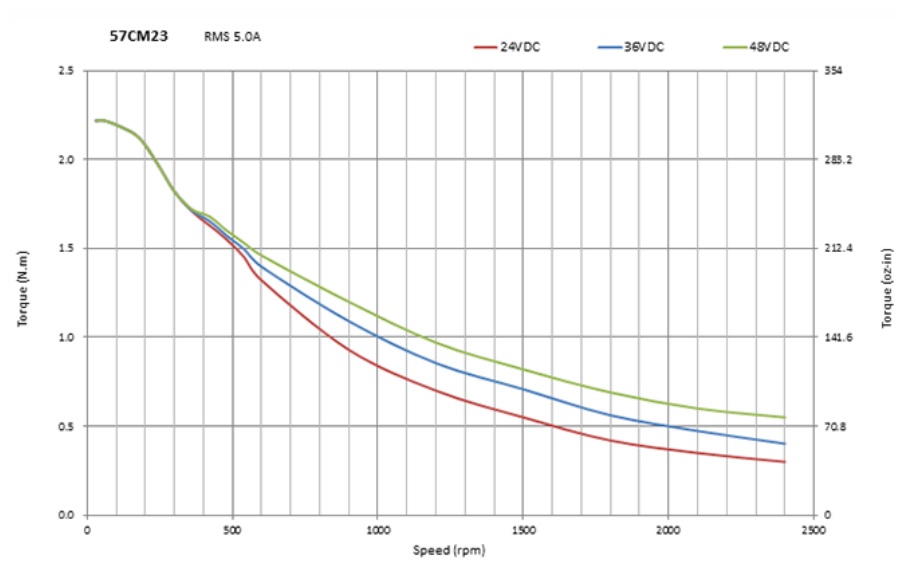
P – stoupání závitu [mm] ; ΔW – Minimální přesnost pokládání drátu [mm]

Na základě výsledku z rovnice (13) byl jako pohon posuvu vedení drátu zvolen dvoufázový krokový motor 57CM23 od výrobce Leadshine Technology Co. Ltd, jehož úhel kroku je $1,8^\circ$. Ve standardním režimu ovládání (režim celých kroků) je tedy jedna jeho otáčka rozdělena na 200 kroků (14). Motor je schopný vyvinout točivý moment až $2,3 \text{ N.m}$ (Obr. 21).

$$steps = \frac{360^\circ}{1,8^\circ} = 200 \quad (14)$$



Obr. 21 - 57CM23-4A – krokový 2-fázový motor 2,3 N.m



Graf 4 - Závislost točivého momentu na otáčkách motoru 57CM23 [23]

Tabulka 4 - Parametry 2-fázového motoru 57CM23

Typ příruby	NEMA23
Úhel kroku	1,8°
Točivý moment [N.m]	2,3
Elektrický proud [A]	4
Elektrický odpor vinutí [Ω]	0,5 \pm 10%
Indukčnost [mH]	2 \pm 20%
Moment setrvačnosti [kg.cm²]	0,48
Hmotnost [kg]	1,1
Rozměry hřídele [mm]	$\varnothing 8 \times 20$

4.5 Řízení pohonu posuvu

Stejně jako v případě volby řízení pohonu vřetene (4.3), bylo přihlédnuto na doporučení výrobce motoru. Výrobce doporučuje použití krokového driveru EM870S, který je méně výkonnou verzí krokového driveru EM882S představeného v kapitole (4.3). Značení vstupů a módy ovládání tedy zůstávají stejné. Jediný parametr, který se liší je špičkový proud.

Tabulka 5 - Parametry krokového driveru EM870S

Napájecí napětí [V]	20 – 80
Špičkový proud [A]	0,5 – 7
Max. výstupní frekvence [kHz]	200

4.6 Napájení

Jako nejvhodnější typ napájecího zdroje se díky nízké hmotnosti a relativně malým rozměrům jeví spínaný zdroj. Vstupní požadavky pro jeho volbu jsou jeho výstupní napětí a jeho elektrický výkon. Oba modely krokových driverů zvolených v kapitolách (4.3)(4.5) vyžadují napájecí napětí v rozsahu $U = 20V - 80V$. U obou krokových motorů zvolených v kapitolách (4.2)(4.4.2) výrobce uvádí fázový proud $I = 4 A$. Na základě těchto parametrů byl zvolen spínaný zdroj RPS608 od výrobce Leadshine Technology Co. Ltd. s parametry:

Tabulka 6 - Parametry spínaného zdroje RPS608

Výstupní napětí [V]	60
Jmenovitý výstupní proud [A]	8,5
Špičkový výstupní proud [A]	10,5

Zdroj svými parametry splňuje vstupní požadavky, navíc je opatřen vestavěným EMI filtrem³ a ochranou proti přetížení, přepětí a zkratu na vstupu.

4.7 Uložení rotačních součástí

Rotační uložení pohybového šroubu bylo realizováno pomocí dvou kuličkových ložisek od společnosti FGJ Bearing (modely UCP201 a UCFL201), která byla dodána jako komplet i s ložiskovými domky, které umožňují aretaci pohybového šroubu. Oba modely ložiskových kompletů navíc vyrovnávají nesouosost uložení díky výkyvnému uložení ložiska.

³ *Electro-Magnetic Interference filter* – filtr elektromagnetického rušení



Obr. 22 - Ložiskový komplet typu UCP (vlevo) [24]



Obr. 23 - Ložiskový komplet typu UCFL (vpravo) [25]

Rotační uložení vřetene bylo realizováno dvěma přírubovými ložiskovými jednotkami, určenými pro pevné uchycení hřídele od výrobce SYK Sonyung Industry (model FK 10).



Obr. 24 - Ložisková jednotka FK10 [26]

4.8 Kontroler

Řízení bylo realizováno pomocí vývojové desky Arduino UNO R3. Volba byla provedena primárně kvůli nízké pořizovací ceně a široké dostupnosti modulů, knihoven a dokumentace. Autor měl navíc předchozí zkušenosti s programováním v jazyce C++. Deska je poháněna 8bitovým mikročipem ATmega328PU. Dále je vybavena keramickým oscilátorem udržujícím frekvenci procesoru na 16 MHz [27].

Důležité parametry systému [27]

- 32KB Flash paměti
- 2KB SRAM
- 1KB EEPROM

- Sériové rozhraní USART
- 14 digitálních pinů GPIO
- 6 analogových vstupů

5 Návrh stroje

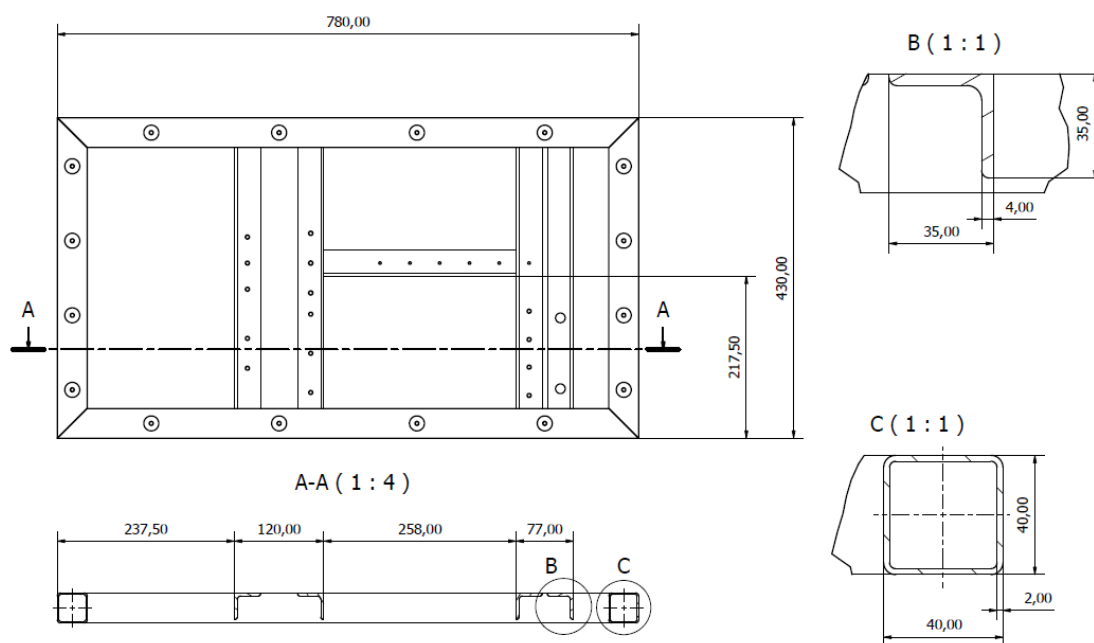
Konstrukce navíjecího stroje byla kompletně navržena v CAD softwaru Autodesk Inventor Professional. Ten nabízí mimo standardních CAD funkcionalit i možnost MKP pevnostní analýzy a dalších pokročilých funkcí.

5.1 Konstrukce rámu

Od navrženého rámu se odvíjí tuhost a přesnost celého systému, proto návrh prošel několika iteracemi. Konstrukce rámu byla v tomto procesu vyztužena na místech kritických pro tuhost stroje. Rám byl následně zakázkově vyroben ve specializované dílně, kde byl svařen z ocelových profilů a následně práškově lakován kvůli koroziodolnosti a estetickému vzhledu.

Použité profily:

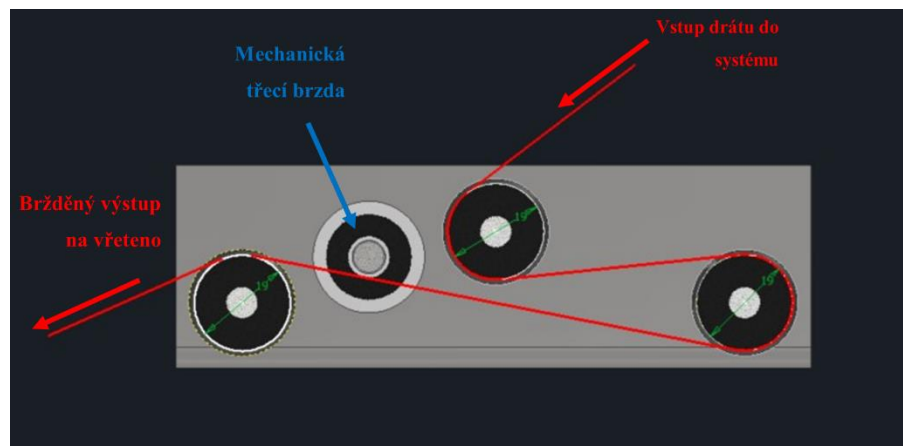
- 4x profil se čtvercovým průřezem – **ISO 10799-2 40x40x2**
- 5x profil otevřený průřezu L rovnoramenný – **ISO 657-1 L35x35x4**



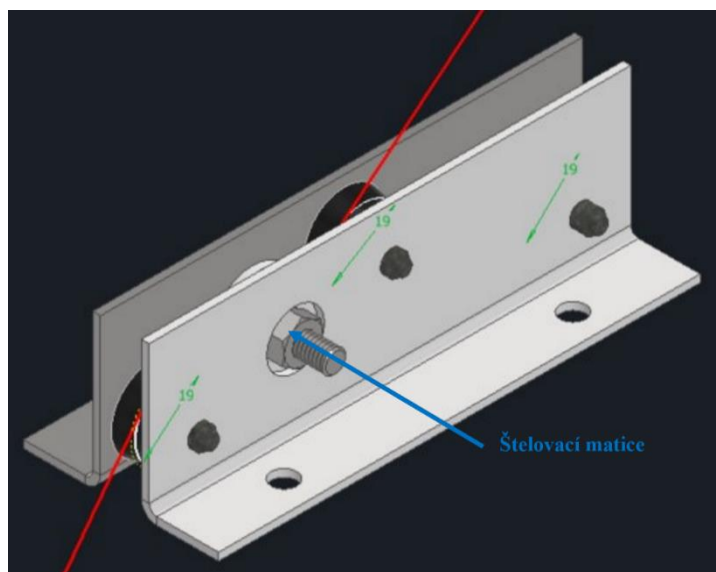
Obr. 25 - Výstřižek z výkresové dokumentace rámu

5.2 Konstrukce brzdícího systému

Brzdící systém navíjecího stroje je, jak bylo zmíněno v kapitole (2.3.1), jednou z klíčových součástí stroje. Jeho správné fungování je jedním z hlavních faktorů ovlivňující výslednou kvalitu vinutí. Bylo zvoleno kladkové vedení, které je vzhledem k poměrně velkému rozsahu navíjených průměrů nejlépe vyhovující. Brždění drátu bylo realizováno pomocí mechanické třecí brzdy (Obr. 26), která nabízí velký rozsah brzdící síly. Nastavování brzdné síly se provádí povolením nebo utažením štelovací matice (Obr. 27). V brzdícím systému je dostatečná síla vytvářena pomocí dvojice přitlačných brzdných ploch s vyměnitelnými filcovými kotouči. Navíjený drát je v systému usměrňován užitím tří ložiskových kladek s drážkou do V, která umožňuje pokládání navíjeného drátu na definovanou polohu na kostře cívky (Obr. 26).



Obr. 26 - Brzdící systém v řezu



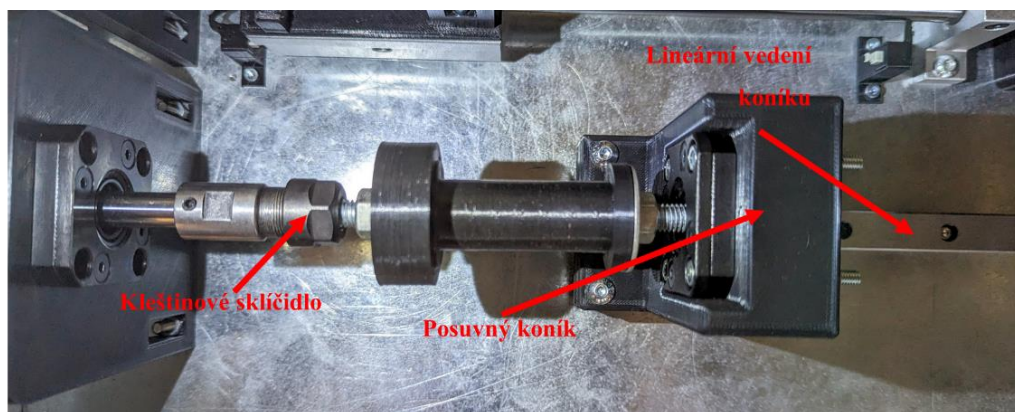
Obr. 27 - Štelovací matice, pro nastavení brzdící síly

5.3 Konstrukce krycích plechů

Pro zajištění ochrany uživatele před úrazem byl stroj opatřen krycími plechy. Výkonové komponenty jako napájecí zdroj, krokové motory a jejich krokové drivery byly umístěny za tyto plechy. Krycí plechy byly společně s rámem uzemněny, aby byl stroj v případě poruchy odpojen od napájecí sítě. Není tedy možné, aby byla jakákoli konstrukční část stroje pod napětím. Konstrukce krycích plechů byla navržena tak, aby bylo možné jednotlivé plechy řezat na CNC plazmovém řezacím stroji a následně ohýbat na ohraňovacím lisu.

5.4 Konstrukce vřetene

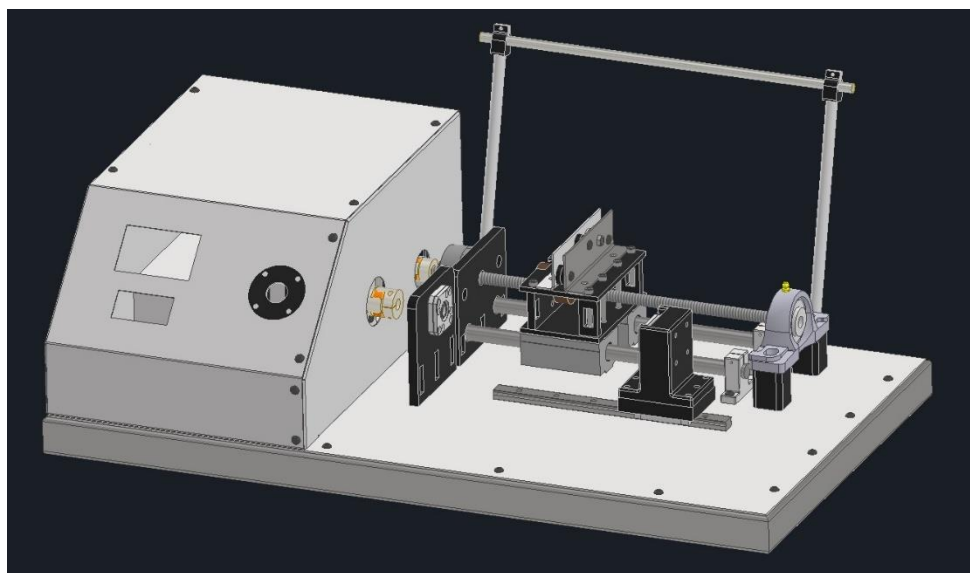
Základními požadavky pro konstrukci stroje je schopnost navíjet cívky různých délek o různých průměrech drátu. U volby konstrukce vřetene je tedy nutné dbát na všestrannost, tedy aby bylo možné do systému upnout jakoukoli kostru. Byl zvolen systém, který má na poháněné straně vřetene umístěné kleštinové sklíčidlo ER11. Na druhé straně vřetene se nachází posuvný koník, umístěný na lineárním vedení MGN15, díky kterému je zaručeno minimální házení i při navíjení dlouhých cívek.



Obr. 28 - Sestava vřetene s posuvným koníkem

5.5 Kompletní model stroje

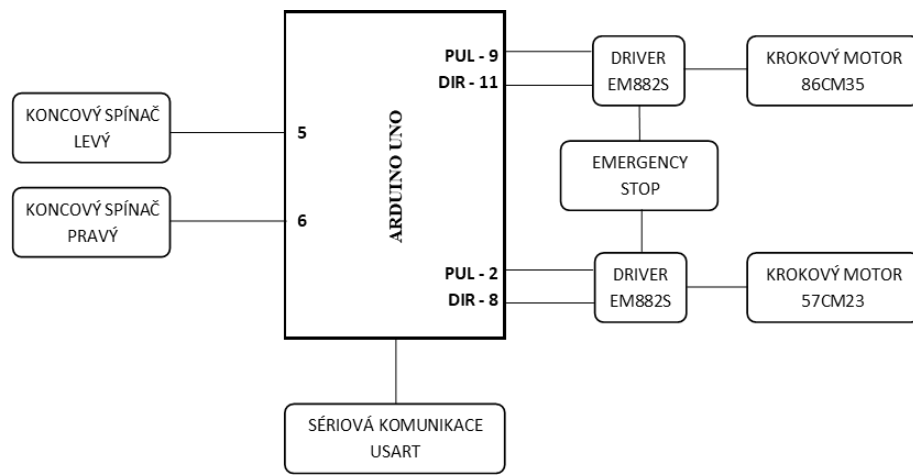
Z důvodu finančních a časových úspor byly díly, které měly být vyrobeny na CNC frézce, zhotoveny z PLA plastu. Díly byly vytištěny na 3D tiskárně Ender 3 Pro od výrobce Creality. Na obrázku (Obr. 29) je možné vidět kompletní CAD model stroje, na jehož základě byl celý stroj později sestaven.



Obr. 29 - CAD model navíjecího stroje

5.6 Elektrická část

Vzhledem ke skutečnosti, že nebylo použito absolutní odměřování polohy, bylo nutné vybavit navíjecí stroj koncovými spínači, od kterých je absolutní poloha posuvu odměřována. Z bezpečnostních důvodů byl do obvodu zapojen také bezpečnostní spínač EMERGENCY STOP pro zastavení pohybu krokových motorů.



Obr. 30 - Blokové schéma elektrického zapojení

6 Řízení

Program řídicí navíjecí stroj byl sepsán v programovacím jazyku C++. Kritické pro správnou funkci navíjecího pohybu je programově synchronizovat otáčky motoru a posuv vedení drátu. Dále je nezbytné, aby bylo možné zadávat parametry navíjení.

Pro komunikaci s řídicí jednotkou stroje byl vyvinut jednoduchý protokol, pomocí kterého jsou stroji zadávány požadavky. Komunikace probíhá prostřednictvím sériové komunikace USART a příkazy je možné zadávat připojením počítače USB kabelem. Ovládací příkazy lze řídicí jednotce zadávat i jakýmkoli jiným zařízením schopným komunikovat po sériové lince modulační rychlostí 9 600 Bd.

Tabulka 7 - Protokol pro sériovou komunikaci

Název kódu	Identifikační znak	Parametr	Popis
MODE	M	0	Pohotovostní režim, zastavené motory
-	-	1	Lineární posuv konstantní rychlostí S
-	-	2	Otáčení vřetene konstantními otáčkami N
-	-	4	Režim navíjení (synchronizace pohybů M1 a M2)
-	-	28	Režim autohome (nalezení polohy levého koncového spínače a reset absolutních souřadnic)
POSUV	S	+(číslo)	Nastavení posuvu motoru do kladného směru [mm/min]
-	-	-(číslo)	Nastavení posuvu motoru do záporného směru [mm/min]
OTÁČKY	N	+(číslo)	Nastavení otáček vřetene do kladného směru [mm/min]
-	-	-(číslo)	Nastavení otáček vřetene do záporného směru [mm/min]
PRŮMĚR DRÁTU	D	(číslo)	Nastavení průměru drátu [μm]
POČET ZÁVITŮ	Z	(číslo)	Nastavení počtu závitů [-]
DÉLKA CÍVKY	W	(číslo)	Nastavení délky navíjené cívky [mm]

Po přijmutí příkazu S nebo N provede řídicí jednotka výpočet, pomocí kterého určí dobu trvání jednoho krokového impulsu. V případě posuvu (15) a v případě pohonu vřetene (16). Výsledné vztahy byly určeny použitím hodnot $P = 3 \text{ mm}$ a

$$PulR = 400 \text{ krok} \cdot ot^{-1}.$$

$$T_{POS} = \frac{P \cdot 60\,000\,000}{2 \cdot S \cdot PulR} = \frac{3 \cdot 60\,000\,000}{2 \cdot S \cdot 400} = \frac{225\,000}{S} [\mu s] \quad (15)$$

$$T_{VŘ} = \frac{60\,000\,000}{2 \cdot N \cdot PulR} = \frac{60\,000\,000}{2 \cdot N \cdot 400} = \frac{75\,000}{S} [\mu s] \quad (16)$$

T_{POS} – doba trvání krokového impulsu posuvu [μs];

$T_{VŘ}$ – doba trvání krokového impulsu posuvu [μs];

P – stoupání závitu pohybového šroubu [mm];

S – požadovaná rychlost posuvu [$mm \cdot min^{-1}$];

N – požadované otáčky vřetena [min^{-1}];

$PulR$ = počet kroků na otáčku motoru [$krok \cdot ot^{-1}$]

Při synchronizaci pohybů nebylo možné použít “klasický“ příkaz čekání *delay()* z důvodu časové blokace kódu (během čekání je program pozastaven a nemůže provádět jiné operace). Bylo tedy přistoupeno k neblokující formě řízení krokových impulsů pomocí časovače a rychlých rozhodovacích neblokujících funkcí. Na obrázku (Obr. 31) je možné vidět, že hlavní programová smyčka *void loop()* podle zvoleného **MÓDU** pouze volá funkci *ctecka()* a příslušnou funkci pohybu. Funkce *ctecka()* v případě, že se v sériovém bufferu nachází nějaká data, vyhodnotí jejich význam podle (Tabulka 7) a nastaví hodnoty pro dané proměnné. V případě, že je sériový buffer prázdný, nevykoná funkce *ctecka()* žádný zásah. Programovým časovačem bylo zaznamenáno, že v takovém případě trvá jeden průchod programu necelých $7\mu s$.

```

void loop()
{
  while(MODE == 0) //Pohotovostni mod, motory stojí
  {
    ctecka(); //zavolam fci ctecka, abych zjistil, zda je neco na sbernici(pokud ne, tak trva 7us)
  }
  while(MODE == 1) //Linearni posuv konstantni rychlosti
  {
    //LoopTimer.check(Serial); //Abych vedel jak dlouho bezi ten while
    ctecka(); //zavolam fci ctecka, abych zjistil, zda je neco na sbernici(pokud ne, tak trva 7us)
    LinMan(); //zavolam fci LinMan (Linearni motor - manualni posuv)
  }
  while(MODE == 2) //Otaceni vretene konstantnimi otackami
  {
    ctecka(); //zavolam fci ctecka, abych zjistil, zda je neco na sbernici(pokud ne, tak trva 7us)
    RotMan(); //zavolam fci RotMan (Rotacni motor - manualni posuv)
  }
  while(MODE == 28) //Autohome
  {
    ctecka(); //zavolam fci ctecka, abych zjistil, zda je neco na sbernici(pokud ne, tak trva 7us)
    homing(); //Provedu urceni nulove polohy
  }
  while(MODE == 4) //Navijeni civky
  {
    ctecka(); //zavolam fci ctecka, abych zjistil, zda je neco na sbernici(pokud ne, tak trva 7us)
    RotMan(); //zavolam fci RotMan (Rotacni motor - manualni posuv)
    LinMan(); //zavolam fci LinMan (Linearni motor - manualni posuv)
  }
}

```

Obr. 31 - Hlavní programová smyčka void loop()

Všechny pohyby stroje jsou podmíněny nestlačenými koncovými spínači. Pokud je některý z nich v průběhu pohybu stisknut, je zavolána funkce *emergencyPullOut()*, která zastaví pohyb posuvu a provede jednu otáčku motoru posuvu v opačném směru a uvede stroj do módu *M0*.

7 Výsledky

Na (Obr. 32) je zachycen zkompletovaný stroj, pro představu o rozměrech byla do záběru umístěna referenční plechovka piva.



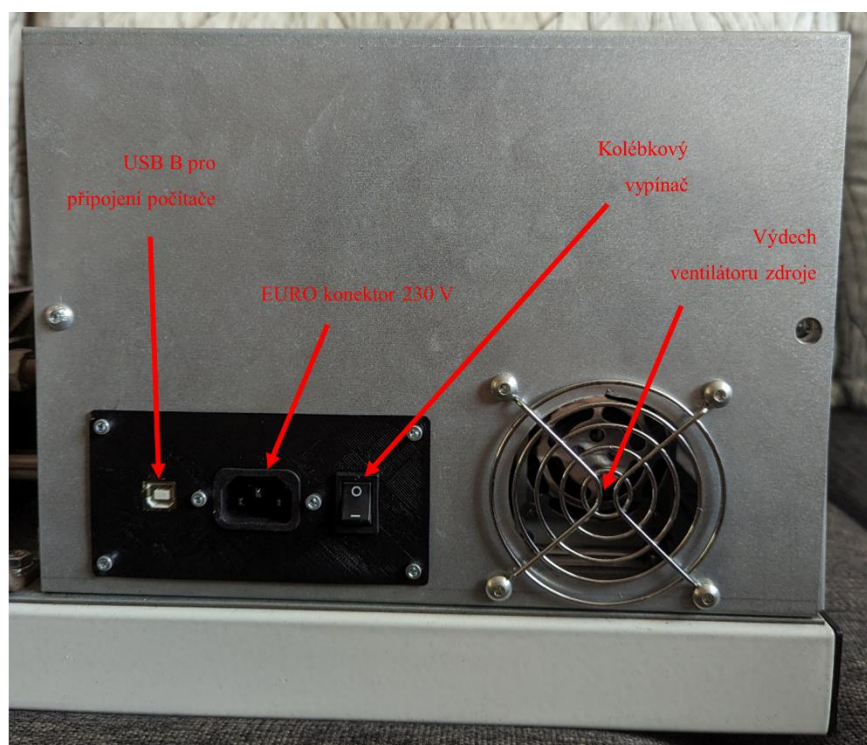
Obr. 32 - Přední pohled na zkompletovaný stroj (plechovka piva pro měřítko)

Na obrázku (Obr. 33) je možné vidět cívku navinutou strojem z měděného drátu $\varnothing 0,8\text{mm}$ při otáčkách 200 min^{-1} . Na obrázku (Obr. 34) se nachází cívka tenká cívka s neprůchozí kostrou navinutá z drátu $\varnothing 0,3\text{mm}$ při otáčkách 600 min^{-1}



Obr. 33 - Cívka ze drátu $\varnothing 0,8\text{mm}$ (vlevo)

Obr. 34 - Cívka ze drátu $\varnothing 0,3\text{mm}$ (vpravo)



Obr. 35 -Pohled zezadu

Závěr

V rámci bakalářské práce bylo nejprve provedeno detailní seznámení s problematikou lineárního navíjení cívek. Byly popsány základní prvky lineárního navíjecího stroje a uvedeny dopady, které má jejich volba na kvalitu navíjení. Dále byly představeny jednotlivé způsoby, kterými cívky navíjet.

Byly představeny možnosti pro volbu pohonu vřetene a pohonu podélného posuvu stroje. V druhé části práce byly uvedeny požadavky na navrhovaný stroj. Na základě požadavků a teorie představené v první části práce byly navrženy a nedimenzovány jednotlivé součásti navíjecího stroje. Ze zvolených a navržených komponent byl následně sestaven 3D model stroje, podle kterého byl stroj vyroben. Řízení stroje bylo realizováno vývojovou deskou Arduino UNO. Řídící software byl napsán v programovacím jazyku C++. Dále byl navržen protokol, pomocí kterého lze po sériové lince řídicí jednotce zadávat příkazy pro ovládání stroje. V poslední kapitole byl představen finální produkt a ověřena jeho funkce.

Stroj je schopný navíjet dráty různých průměrů pomocí regulace brzdné síly prováděné štelovací maticí. Největší zřetel byl kladen na mechanickou konstrukci stroje, která je svou tuhostí a přesností polohování srovnatelná s menšími navíjecími stroji používanými v průmyslu. V případě potřeby navíjet speciální průřezy cívek je možné stroj o tuto funkcionalitu rozšířit pouze pomocí aktualizace řídicího softwaru.

Autor plánuje na stroji dále pracovat, pokud mu to bude umožněno a vybavit stroj řídicí jednotkou s displejem a ovládacími tlačítky pro jednodušší ovládání. Tento obvod, komunikující s hlavní řídicí jednotkou stroje po sériové sběrnici by poté umožnil, aby stroj fungoval bez nutnosti připojení k PC. Konečným stavem by bylo dodat produkt který bude s průmyslovými stroji srovnatelný i v ohledu uživatelské přívětivosti a jednoduchosti ovládání.

Bibliografie

- What material can coils be wound from?. In: *KUK Coils: Customer-specific winding goods and EMS* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.kukcoils.com/world-of-induction/what-material-can-coils-be-wound-from>
- Image003. In: *Scigroup* [online]. [cit. 2023-08-11]. Dostupné z: https://www.scripgroup.com/files/limba/ceha-slovaca/tehnica-mecanica/81_poze/image003.jpg
- PGP_Bobbin 20coil1. In: *KUK Coils* [online]. [cit. 2023-08-11]. Dostupné z: https://25463740.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hub/25463740/hubfs/05_website/02_solutions/1.2%20Bobbin%20coils/1.2.2%20Windings%20on%20customer-specific%20bobbins/PGP_Bobbin%20coil1.png?upscale=true&upscale=true&width=855&height=750&name=PGP_Bobbin%20coil1.png
- HAGEDORN, Jürgen, Florian SELL-LE BLANC a Jürgen FLEISCHER, ed. *Handbook of Coil Winding*. Berlin: Springer Vieweg, 2017. ISBN 978-3-662-54401-3.
- Toroidal 202. In: *KUK Coils* [online]. [cit. 2023-08-11]. Dostupné z: https://25463740.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hub/25463740/hubfs/05_website/02_solutions/1.2%20Bobbin%20coils/1.2.3%20Toroidal%20coil/Toroidal%202.png?upscale=true&upscale=true&width=855&height=750&name=Toroidal%202.png
- Consequences of errors in the wire tension control. In: HAGEDORN, Jürgen, Florian FLEISCHER a Jürgen SELL-LE BLANC. *Handbook of Coil Winding*. Berlin: Springer Vieweg, 2017, s. 163. ISBN 978-3-662-54401-3.

- MWS WIRE INDUSTRIES. *Recommended Winding Tensions* [online]. In: . 2016
7] [cit. 2023-08-12]. Dostupné z: <https://mwswire.com/wp-content/uploads/2016/10/Recommended-Winding-Tensions.pdf>
- HARPER, BOB. Wind It Up: Automate a Tough Task. In: *DIYODE* [online]. [cit.
8] 2023-08-12]. Dostupné z: https://diyodemag.com/_images/5a16512bc672e0fb7fddfb54
- RUBY NOZZLE (STAINLESS BODY) - R11102. In: *TROPHY: Best*
9] *Manufactured Solutions* [online]. [cit. 2023-08-13]. Dostupné z: <http://trophycorp.com/uploads/2015/04/121240526472.png>
- Metal Coil Materials. In: *HBR Industries* [online]. [cit. 2023-08-13]. Dostupné z:
10] <https://www.hbrindustries.com/coil-materials>
- FULLY AUTOMATIC HOT AIR COIL WINDING MACHINE. In: *Ingrid West*
11] *Machinery Ltd* [online]. [cit. 2023-08-13]. Dostupné z: https://www.coilwindingmachines.eu/automatic_winding_machines/hot_air_coil_winding_machine.html
- ITP_871-B65814N1012D001_t. In: *MOUSER ELECTRONICS* [online]. [cit.
12] 2023-08-13]. Dostupné z: https://www.mouser.com/images/tdk/lrg/ITP_871-B65814N1012D001_t.jpg
- Structure of a random winding. In: HAGEDORN, Jürgen, Florian SELL-LE
13] BLANC a Jürgen FLEISCHER. *Handbook of Coil Winding*. Berlin: Springer Vieweg, 2017, s. 146. ISBN 978-3-662-54401-3.
- Orthocyclic winding. In: *CNC Design Limited* [online]. [cit. 2023-08-13].
14] Dostupné z: <http://www.ukcnc.net/wp-content/uploads/2020/11/Orthocyclic-winding.jpg>
- Types of layer structure for the orthocyclic winding. In: HAGEDORN, Jürgen,
15] Jürgen FLEISCHER a Jürgen SELL-LE BLANC. *Handbook of Coil Winding*. Berlin: Springer Vieweg, 2017, s. 149. ISBN 978-3-662-54401-3.

- DOBROSCHE, Andreas. *Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte*. Bamberg, 2011. ISBN 978-3-87525-317-7. urn:nbn:de:bvb:29-opus4-109865. Disertační práce. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Technische Fakultät. Vedoucí práce Jörg Franke.
- Illustration of the castor angle for the wire or wire guide. In: HAGEDORN, Jürgen, Florian FLEISCHER a Jürgen SELL-LE BLANC, ed. *Handbook of Coil Winding*. Berlin: Springer Vieweg, 2017, s. 152. ISBN 978-3-662-54401-3.
- PIHLQUIST, Daniel. Generate gray code disk. In: *Mathworks* [online]. [cit. 2023-08-14]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/matlabcentral/mlc-downloads/downloads/submissions/40928/versions/3/screenshot.jpg>
- 766-86CM35. In: *CNC Shop: CNC & automatizace* [online]. [cit. 2023-08-14]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/upload/products/preview/766-86CM35.gif>
- 86CM35_Torque_Curves. In: *CNC Shop: CNC & automatizace* [online]. [cit. 2023-08-14]. Dostupné z: http://www.cncshop.cz/img/KM/86CM35_Torque%20Curves.png
- 770-EM882S. In: *CNC Shop: CNC & automatizace* [online]. [cit. 2023-08-14]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/upload/products/preview/770-EM882S.png>
- EM882S - User Manual: Digital Microstep Drive*. Revision 1.0. Shenzhen, Guandong China, 2017. Dostupné také z: <http://www.cncshop.cz/EM/EM882S.pdf>
- 57CM23_Torque_Curves. In: *CNC Shop: CNC & automatizace* [online]. [cit. 2023-08-14]. Dostupné z: http://www.cncshop.cz/img/KM/57CM23_Torque%20Curves.png
- 453-UCP. In: *CNC Shop: CNC & automatizace* [online]. [cit. 2023-08-15]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/upload/products/preview/453-UCP.jpg>

609-ucfl. In: *CNC Shop: CNC & automatizace* [online]. [cit. 2023-08-15].
25] Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/upload/products/preview/609-ucfl.jpg>

617-FK_SYK_img. In: *CNC Shop: CNC & automatizace* [online]. [cit. 2023-08-
26] 15]. Dostupné z: http://www.cncshop.cz/upload/products/preview/617-FK_SYK_img.jpg

Arduino UNO R3. In: *Arduino Documentation* [online]. [cit. 2023-08-15].
27] Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>

Seznam obrázků

Obr. 1 - Konstrukce cívky [2]	8
Obr. 2 - Válcová cívka [3]	9
Obr. 3 - Disková cívka [4]	9
Obr. 4 - Toroidní cívka [5].....	9
Obr. 5 - Důsledky příliš vysoké, optimální a příliš nízké tahové síly [6].....	10
Obr. 6 - Kladkové vedení na navíjecím stroji [8]	14
Obr. 7 - Hlavice s rubínovou špičkou [9]	14
Obr. 8 - Polymerová kostra s drážkou pro unašeč [12]	15
Obr. 9 - Diagram k určení fill factoru	16
Obr. 10 - Průřez cívkou vyrobenou metodou náhodného vinutí [13].....	17
Obr. 11 - Schéma ortocyklického vinutí s patrnou přechodovou oblastí [14].....	18
Obr. 12 - Geometrie ortocyklického navíjení	18
Obr. 13 -Uspořádání vrstev pro stejný počet závitů na vrstvu [15].....	20
Obr. 14 - Uspořádání vrstev pro nerovnoměrný počet závitů na vrstvu, počínaje krátkou vrstvou [15].....	20
Obr. 15 - Uspořádání vrstev pro nerovnoměrný počet závitů na vrstvu, počínaje krátkou vrstvou [15].....	21
Obr. 16 – Diagram kladného (vlevo) a záporného (vpravo) α_{MAX} [17]	22
Obr. 17 - Příklad 9bitového Grayova kódu umístěného po obvodu kotouče [18].....	24
Obr. 18 - Moment M potřebný pro vyvinutí napínací síly F	25
Obr. 19 - 86CM35 – krokový 2-fázový motor 3,5 N.m [19].....	26
Obr. 20 - Driver krokových motorů EM882S [21].....	28
Obr. 21 - 57CM23-4A – krokový 2-fázový motor 2,3 N.m	31
Obr. 22 - Ložiskový komplet typu UCP (vlevo) [24].....	34
Obr. 23 - Ložiskový komplet typu UCFL (vpravo) [25]	34

Obr. 24 - Ložisková jednotka FK10 [26].....	34
Obr. 25 - Výstřižek z výkresové dokumentace rámu.....	36
Obr. 26 - Brzdící systém v řezu	37
Obr. 27 - Štelovací matice, pro nastavení brzdící síly	38
Obr. 28 - Sestava vřetene s posuvným koníkem.....	39
Obr. 29 - CAD model navíjecího stroje.....	39
Obr. 30 - Blokové schéma elektrického zapojení	40
Obr. 31 - Hlavní programová smyčka void loop().....	43
Obr. 32 - Přední pohled na zkompletovaný stroj (plechovka piva pro měřítko)	44
Obr. 33 - Cívka ze drátu $\varnothing 0,8\text{mm}$ (vlevo).....	44
Obr. 34 - Cívka ze drátu $\varnothing 0,3\text{mm}$ (vpravo)	44
Obr. 35 -Pohled zezadu.....	45

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Doporučená napínací síla [7].....	11
Tabulka 2 - Parametry 2-f krokového motoru 86CM35	27
Tabulka 3 - Parametry krokového driveru EM882S.....	28
Tabulka 4 - Parametry 2-f krokového motoru 57CM23	32
Tabulka 5 - Parametry krokového driveru EM870S.....	32
Tabulka 6 - Parametry spínaného zdroje RPS608	33
Tabulka 7 - Protokol pro sériovou komunikaci	41