



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Návrh jednoúčelového stroje pro navíjení popruhů

Bakalářská práce

Studijní program:

Autor práce:

Vedoucí práce:

B0714A270001 Mechatronika

Jakub Novák

Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky





Zadání bakalářské práce

Návrh jednoúčelového stroje pro navíjení popruhů

Jméno a příjmení: **Jakub Novák**
Osobní číslo: M19000093
Studijní program: B0714A270001 Mechatronika
Zadávací katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

1. Definujte rozsah úkolů stroje a způsob realizace samotného navíjení, případně i páskování.
2. Navrhněte mechanickou konstrukci stroje, který umožní realizovat zadaný úkol navíjení, případně i páskování, popruhů. Diskutujte různé možnosti konstrukce.
3. Vyberte vhodné pohony, senzory, elektrické a pneumatické prvky atd. Popište elektrické a pneumatické zapojení stroje.
4. Vytvořte a popište řídicí algoritmus, který umožní uvedení stroj do provozu a jeho chod.
5. V rámci provozních možností testujte funkčnost celého stroje.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
30–40 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] SOUČEK, Pavel. Servomechanismy ve výrobních strojích. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02902-6.
- [2] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení. 2., přeprac. vyd.* Praha: BEN, 2004. ISBN 978-80-7300-148-3.
- [3] BERKA, Štěpán. Elektrotechnická schémata a zapojení v praxi. Brno: Computer Press, 2015. ISBN 9788025145982.

Vedoucí práce:

Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce:

12. října 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

16. května 2022

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 12. října 2021

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

16. května 2022

Jakub Novák

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu panu Ing. Lukáši Hubkovi Ph.D. za rady při psaní této bakalářské práce. Dále vedení a personálu firmy Singing Rock za umožnění vzniku této práce a ochotnou spolupráci. A také několika nejmenovaným vyučujícím a lidem z oboru za rady při vymýšlení konstrukčních řešení stroje.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem jednoúčelového stroje na namotávání a páskování textilních popruhů používaných v tlumičích pádu. Nejprve rozebírá potřebné funkce a samotnou konstrukci stroje. Porovnává různé její varianty, jejich rychlost, účinnost a náročnost na výrobu. Následně pojednává o procesu návrhu jednotlivých klíčových mechanických konstrukčních prvků. Ukazuje proč byl zvolen konkrétní typ motoru nebo lineárního vedení. Vysvětluje funkce jednotlivých částí zařízení. Dále představuje možné zapojení pneumatických prvků stroje, vysvětluje jejich funkci, a důvod použití. Popisuje navržené elektrické součásti zařízení a to, jak vypadá obvod nízkého napětí. Ukazuje zapojení sensoriky, displeje a jednotlivých digitálních vstupů a výstupů do modulů PLC. V kapitole „Řídící software“ řeší problematiku řízení stroje a řídicího algoritmu používající koncový automat. Dále pojednává o krocích k zajištění bezpečnosti provozu. V závěrečné části práce analyzuje navržené řešení, hodnotí splnění stanovených cílů a projednává možnosti budoucího zlepšení.

Klíčová slova: jednoúčelový stroj, PLC, sensorika, řízení, koncový automat, lineární vedení, 3D tisk, krokový motor, pneumatika

Abstract

This Bachelor thesis deals with the design of a single-purpose machine for winding and strapping textile straps used in fall absorbers. First, it analyses the required functions and specific designs of the machine and compares different variants, their speed, efficiency, and production complexity. Then, it discusses the design process of individual key mechanical components and shows why a specific type of motor or linear guide was chosen. It explains the functions of each part of the device. Then it presents the possible connections of the pneumatic elements of the machine, explains their function and the reasons for their use. It describes the used electrical components of the device and how does a low voltage circuit looks like. It shows the connection of sensors, display, and individual digital inputs and outputs to PLC modules. The chapter "Control Software," deals with the problem of machine control and state machine control algorithms. Then it discusses single steps to ensure operational safety. The final part of the work analyses the proposed solution, evaluates the fulfillment of the set requirements, and discusses the possibilities for future improvements.

Keywords: single-purpose machine, PLC, sensors, machine control, state machine, linear guidance, 3D printing, stepper motor, pneumatics

Obsah

Obsah	8
Seznam zkratk	9
Seznam obrázků, tabulek a grafů	10
Úvod	11
Požadavky na zařízení	12
Proces návrhu	14
1 Koncept	15
2 Navíjecí ústrojí	18
2.1 Motor	18
2.2 Hlavice	20
3 Brzdící ústrojí	23
3.1 Lineární vedení	23
3.2 Uvolnění popruhu	24
4 Balící ústrojí	27
4.1 Podavač	27
4.2 Páskovačka	29
5 Pneumatické zapojení	30
6 Elektrické zapojení	33
7 Řídící software	36
8 Bezpečnost	40
Závěr	43
Seznam literatury	46
Seznam příloh	48
Přílohy	49

Seznam zkratek

FM	Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
BP	bakalářská práce
IS/STAG	Informační systém studijní agendy
ISBN	International Standard Book Number, mezinárodní standardní číslo knihy
ISSN	International Standard Serial Number, identifikační číselný kód pro názvy periodik a pokračujících zdrojů
ČSN	česká technická norma
ČSN EN	česká verze evropské normy
ČSN ISO	česká verze mezinárodní normy (ISO = International Organization for Standardization)
ČSN IEC	česká verze normy vydané Mezinárodní organizací pro normalizaci v elektrotechnice (IEC)
PLC	programovatelný logický automat
3D	„trojrozměrný“
CAD	computer-aided design, počítačem podporované projektování
DO	digital output, digitální výstup
DI	digital input, digitální vstup
LED	Light-Emitting Diode, světelná dioda
NO	normally open, parametr spínačů - v normálním stavu rozpojený
NC	normally closed, parametr spínačů - v normálním stavu sepnutý
STO	Safe Torque Off, elektrický signál používaný u ovladačů motoru k bezpečnostním funkcím
PL	požadovaná úroveň vlastností podle [15]
SIL	úroveň integrity bezpečnosti podle [15]

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázky:

1. Nákres jednotlivých akčních členů stroje
2. Testovací prototyp k odhadnutí parametrů stroje
3. Prvotní návrh hlavice motoru
4. Pokročilý návrh hlavice motoru
5. Simulace statického zatížení ocelových vodících tyčí
6. Zjednodušený nákres způsobů zasunutí trnu.
7. Prvotní návrh dopínacího trnu
8. Pokročilý návrh dopínacího trnu
9. Výpočet momentu ramene plně vysunuté ruky
10. Rameno podavače s pístem a lineárním vedením
11. Radiální chapadlo s plastovými packami
12. Schémata zapojení ovládání pro první tři písty
13. Schéma zapojení pneumatického chapadla
14. Nákres jednotlivých prvků v rozvaděči
15. Diagram struktury řídicího programu PLC
16. Diagram programové výrobní sekvence
17. Bezpečnostní kryt rotující části stroje
18. Renderovaný model hotového zařízení

Grafy:

1. Momentové charakteristiky zvažovaných pohonů
2. Graf pro určení požadované PL

Tabulky:

1. Základních parametry stroje
2. Odhadované ceny komponentů stroje

Úvod

V rámci odborných praxí během studia jsem se dostal do provozu firmy na výrobu lezeckého vybavení. Tam jsme se domluvili, že jim pomohu s návrhem jednoúčelového stroje na namotávání a páskování textilních popruhů, který by usnadnil proces výroby. Tyto popruhy jsou součástí tlumičů pádu (příloha 1, 2) používaných při výškových pracích nebo při lezení na zajištěných cestách (ferratách). Toto zadání návrhu stroje zároveň perfektně splňuje požadavky na kvalifikační práci v oboru mechatronika.

Hlavním důvodem pro vznik tohoto zařízení je zvýšení rychlosti a efektivity výroby. V neposlední řadě také odpadá motorická práce namotávání popruhu pro pracovníka a dalším benefitem je, že na pásek, který bude držet popruh pohromadě, lze natisknout příbalové informace o produktu pro zákazníka, případně indikátor bezpečného použití produktu. V současném provozu musí pracovník pokaždé vyndat popruh z krabice, ručně ho namotat a vložit ho do látkového pouzdra, aby nedošlo k jeho opětovnému rozmotání. V případě navrhovaného stroje by obsluha popruh měla pouze nasadit jednou stranou na namotávací trn, druhou stranou na brzdící trn, stisknout tlačítko a veškeré ostatní operace jsou plně automatické. Po dokončení procesu páskovaný popruh padá do krabice připraven k expedici. Výsledný automatizovaný provoz by měl být nejméně dvakrát rychlejší než současný manuální a také pohodlnější pro obsluhu.

Jelikož se jedná o jednoúčelový a velice úzce zaměřený stroj v oboru, který nedosahuje takové masové produkce jako například automobilový průmysl, prakticky neexistovala jakákoliv hotová zařízení nebo konstrukční prvky, z kterých by se dalo čerpat. Informace obecnějšího rázu k jednotlivým částem stroje jsem zjišťoval například z literatury (viz. Seznam literatury) nebo třeba konzultacemi s vyučujícími nebo zkušenějšími lidmi z oboru, ale celkový způsob činnosti stroje bylo nutné vymyslet od základů.

Samotný návrh stroje byla z naprosté většiny moje práce. Ale vzhledem k tomu, že návrh postupně vznikal podle požadavků firmy, bylo nutné design jednotlivých částí a prvků často konzultovat. Tudíž i jisté nápady a konstrukční řešení vznikly během společné diskuse s vedoucím výroby, zaměstnanci firmy, vyučujícími na univerzitě a nebo třeba se zástupcem firmy Festo. Samotný koncept fungování stroje a jeho částí byl tedy částečně i dílem jiných lidí. Mojí prací bylo, kromě vymyšlení fungování stroje a návrhu, také vytvořit 3D model zařízení, některé výkresy strojních součástí, zhotovení prototypu, vytvořit návrh elektrického zapojení, sepsat proces výroby, vybrat vhodné součásti a prvky, vymyslet řídicí algoritmus a další. Naopak části které nebyly vytvořeny přímo mnou, přesto jsou v této práci okrajově zmíněny, jsou schéma pneumatického zapojení a příručka (manuál) pro obsluhu stroje.

Požadavky na zařízení

Jak už název tématu a úvodní část napovídá, cílem celé této práce je přiblížit proces vzniku návrhu jednoúčelového stroje pro firmu SINGING ROCK s.r.o. [1]. Základní funkcí tohoto stroje je namotání a sepnutí popruhu do kompaktního tělesa, připraveného k dalším fázím výroby. Celé zařízení by mělo být konstrukčně co nejjednodušší, mělo by se snadno a intuitivně obsluhovat, a být bezpečné pro obsluhu. Dále v souladu s normami po stránce elektrické bezpečnosti a mechanické odolnosti. Jednotlivé parametry by měly být nastavitelné. Celý stroj by měl umožňovat budoucí modifikace a vylepšení. Dále být rychlý, plynulý a v neposlední řadě také vyžadovat co nejméně servisování a být snadno opravitelný. To vše za vynaložení co nejnižších nákladů.

Konstrukce stroje musí být pevná, odolná, v budoucnosti snadno opravitelná a co nejvíce dílů by mělo pocházet od jednoho výrobce kvůli jednoduchosti objednání dílů a nižší ceně.

Jednotlivé navrhované díly, které je nutné vyrobit na míru, musí být výrobitelné dostupnými technologiemi, a používat dostupné materiály. V případě složitých nebo méně namáhaných dílů může být výroba koncipována na použití

technologie 3D tisku. U ocelových součástí s nutností vysoké pevnosti nebo odolnosti, by měla být zajištěna co nejjednodušší a nejlevnější výroba.

Elektrická zařízení a zapojení musí být dimenzována tak, aby vydržela předvídatelné situace v provozu. Měla by splňovat základní bezpečnost, aby nemohlo dojít k úrazu elektrickým proudem, vzniku požáru, nebo poškození okolních zařízení. A celé zapojení by mělo být co nejjednodušší.

Řídící program by měl plnit všechny své funkce, běžet stabilně, předvídat chyby obsluhy, umožnit nastavování parametrů a zajistit bezpečný a rychlý provoz.

Proces návrhu

Hlavní a nejdůležitější částí práce na návrhu bylo vymyšlení samotného principu a konstrukce celého stroje a jeho dílčích částí. Rozhodnout, zda pro konkrétní aplikaci použít pneumatické nebo elektrické akční členy. Dále rozhodnout, zda bude stroj vyžadovat řídicí jednotku nebo bude plně řízen obsluhou. A vymyslet a následně vytvořit 3D model komplexních částí stroje.

Nedílnou součástí procesu návrhu bylo také hledání jednotlivých dílů a akčních členů zařízení. Pneumatické akční členy ale i hadičky, šroubení a různé doplňky byly na základě přání vedoucího výroby vybrány od firmy FESTO. Tato firma má k tomuto účelu zřízený online produktový katalog [2] obsahující CAD modely, dokumentaci a katalogové listy. Právě v těch bylo nutné hledat shodu s předem stanovenými a vypočtenými parametry jednotlivých dílů. Zároveň se zde hledalo kompatibilní příslušenství k pístům jako sensory, montážní upevnění nebo pružné spojky. Nosná konstrukce stroje byla vybrána a sestavena z hliníkových profilů od firmy ITEM. Na jejich webu [3] se také nachází online katalog a modely jednotlivých profilů, krytek, lineárního vedení a dalších prvků, které byli pro stavbu použity.

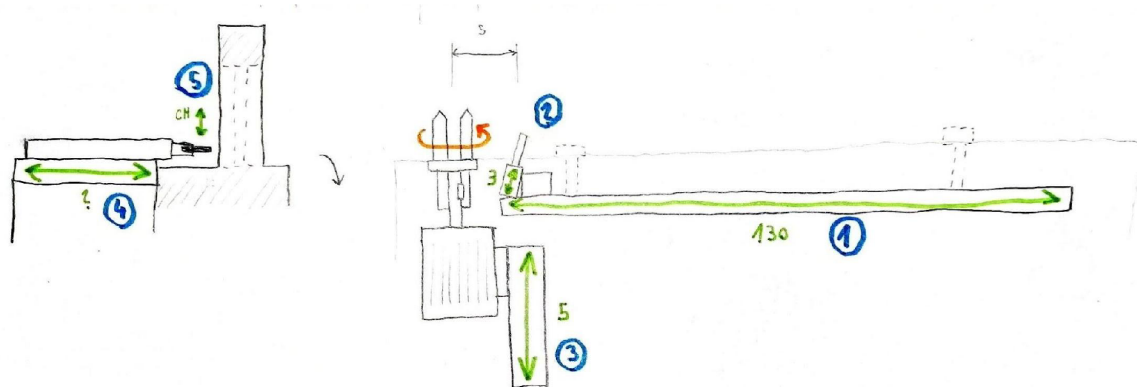
Při výběru dílů a součástí stroje bylo vždy nutné, nejprve určit jednotlivé parametry. Tyto parametry byly určovány za pomoci matematických výpočtů, testování, simulací nebo z ověřených zkušeností konstruktérů. Určení parametrů za pomoci výpočtů je ukázáno například v kapitole „Motor“. Při počítání se jednalo převážně o rovnice statiky a zjišťovaly se veličiny jako hmotnost, točivý moment, síla, případně délka. Testování bylo použito například k odhadnutí ideální rychlosti a síly napínání. K tomuto účelu jsem sestavil jednoduchý demonstrační prototyp stroje, připevnil vrtačku místo motoru, závaží místo napínacího pístu, a testoval ideální sílu dotažení a rychlost otáček motoru. Simulace byly využívány k navrhování vlastních dílů v 3D modelovacím softwaru Fusion 360 [4]. Tento program umožňuje zadání působení sil na těleso, z kterých následně vypočte vnitřní napětí v modelu, bezpečnostní koeficient i například odchylky od původního tvaru po působení sil.

1 Koncept

Poté, co byly stanoveny požadavky na stroj, bylo nejprve nutné vymyslet koncept celého procesu namotání. Jelikož firma na začátku neměla pevně definovanou představu o stroji, začalo se úplnými základy, například zda bude stroj převážně mechanický, elektrický nebo poháněn pneumatikou a také zda bude řízen řídicí jednotkou nebo bude ovládán pouze obsluhou, případně jednoduchou logikou. Nejvíce diskutovaným tématem, které se nakonec změnilo i v průběhu vývoje, byla otázka, zda se bude čerstvě namotaný popruh automaticky strojově páskovat, nebo bude vyjmut obsluhou a vložen manuálně do látkové kapsy. Od toho se následně i odvíjelo, bude li stroj natolik komplikovaný, že bude vyžadovat počítačové řízení, nebo bude ovládán pouze obsluhou. Dalším nápadem bylo celé namotávací ústrojí znásobit, tím pádem namotávat hned několik popruhů najednou. To by jistě zvýšilo efektivitu výroby, ovšem nutně znamenalo vyšší cenu, složitost a také nároky na prostor. Po předložení jednotlivých variant a společném prodiskutování výhod a nevýhod každého navrženého řešení firma nakonec rozhodla, kterým směrem se ubírat.

- Stroj bude automaticky páskovat popruh
- Pro řízení bude použito PLC
- Pokud to půjde, budou akční členy pneumatické
- Pouze jedno namotávací ústrojí

S ohledem na tyto parametry, a po promyšlení konstrukce jednotlivých částí stroje, mohl vzniknout první konkrétnější náčrt (obr. 1) a mohl být určen počet akčních členů stroje. Dále byl sepsán popis jednotlivých úkonů a pohybů akčních členů.



Obrázek 1: Nákres jednotlivých akčních členů stroje

Před startem:

ruka(4) vysunuta, chapadla(5) otevřeno, napínák(1) nastaven do určené polohy, trn(2) vysunut, motor natočen do určené polohy, motor(3) vysunut

Popis procesu:

Obsluha upne popruh...

Obsluha stiskne tlačítko START...

1. Spuštění motoru, brzdění pístem(1)
Sepne se čidlo dorazu na pístu(1)...
2. Zastavení motoru, zastavení pístu(1)
3. Zavření chapadla(5)
Sepne se čidlo dorazu na chapadle(5)...
4. Zasunutí motoru(3), Zasunutí trnu(2)
Sepne se čidlo dorazu na pístu(3)...
5. Zasunutí ruky(4) do páskovačky, nastavení napínáku(1) do určené polohy
Sepne se čidlo dorazu na pístu(4)...
6. Otevření chapadla(5), Vysunutí trnu(2), Vysunutí motoru(3)
Sepne se čidlo dorazu na chapadle(5)...
7. Zpáskování popruhu, natočení motoru do určené polohy
Časová prodleva...
8. Pomalé vysunutí ruky(4)
Popruh padá do krabice...
9. Stroj připraven k opakování procesu

Z vlastní podstaty materiálu navíjeného popruhu dále plynou různé komplikace. Narozdíl od pevných materiálů, se kterými se běžně v průmyslové výrobě setkáváme, má textilie používaná k výrobě popruhů velmi odlišné vlastnosti. V realitě to znamená, že při navrhování namotávacího systému bylo nutné vzít v potaz pružnost materiálu, jeho tendenci se kroutit, což může vadit při namotávání, ale také „kluzký“ povrch. Z tohoto důvodu bylo například nutno jemně ladit a upravovat tvar chapadla posunujícího namotaný popruh.

2 Navíjecí ústrojí

2.1 Motor

Jádrem celého namotávacího stroje je motor. Samotný výběr motoru představoval velmi důležitou součást návrhu a ovlivnil finální výsledek. Při výběru motoru se nejprve musely teoreticky a experimentálně zjistit potřebné parametry. K tomuto účelu bylo nutné sledovat současný „ruční“ proces výroby, a dále byl zhotoven jednoduchý prototyp na zjištění potřebných sil a rychlostí (obr. 2).



Obrázek 2: Testovací prototyp k odhadnutí parametrů stroje

Na výrobu prototypu byl použit ocelový obdélníkový profil. Na jednom konci profilu je upevněn aku šroubovák s namotávací hlavicí. Na druhém konci je nasazen svařovaný ocelový jezdec s háčkem, sloužící k uchycení závaží. Při testování se prototyp postavil do svislé polohy tak, aby jezdec mohl volně jezdit nahoru a dolů, a popruh se jednou stranou upevnil na hlavicí a druhou na jezdec. Závaží působí tíhovou silou odpor motoru při namotávání. Poté byly testovány kombinace různých rychlostí a hmotností závaží k zajištění ideálního dotažení popruhu. Dále byla zkoušením různých hmotností závaží odhadnuta optimální síla

motoru, respektive jeho optimální točivý moment. K výpočtu potřebného momentu motoru z hmotnosti byl použit vzorec (1) přičemž za poloměr r byla dosazena hodnota největšího poloměru namotaného popruhu tj. 70 mm.

$$M = r \cdot m \cdot g \quad (1)$$

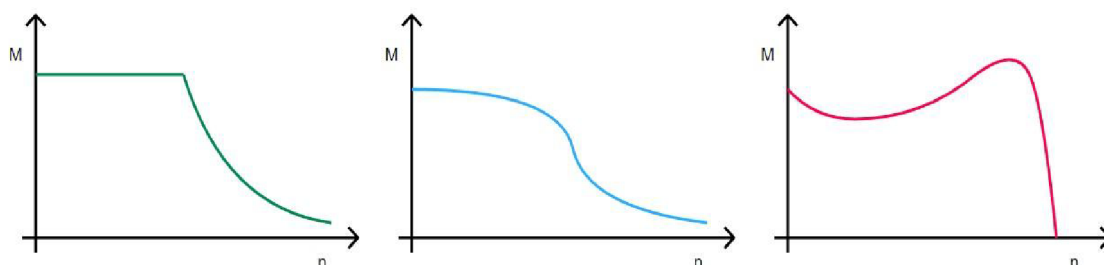
Výsledný maximální točivý moment pro použité závaží $m = 3$ kg při hodnotě tíhového zrychlení $g = 9,81$ m/s² byl tedy $M = 2,06$ Nm. Otáčky motoru byly pozorováním stanoveny v rozmezí 150 - 300 ot/min.

Na začátku procesu výběru byly zvažovány tři druhy motorů. asynchronní motor, synchronní servomotor nebo krokový motor. Při rozhodování bylo nutno brát v potaz hmotnost, výkon, náročnost řízení, ale i způsob zastavení, polohování nebo cenu.

Asynchronní motor má ze zmíněných tří zdaleka nejnižší pořizovací cenu. Dosahuje vysokých hodnot točivého momentu ve vyšších rychlostech, ale špatných hodnot v námi požadovaných nízkých rychlostech (Graf 1). Tento problém by se sice dal vyřešit přidáním převodovky, ale motor zároveň nelze polohovat, špatně se zastavuje, a má vysokou hmotnost, tudíž je pro naši aplikaci nevhodný.

Synchronní servomotor [5] je pro své vlastnosti parametrově asi nejlepším možným řešením. Dosahuje vysokých hodnot točivého momentu v požadovaných nízkých otáčkách (Graf 1). Disponuje absolutním odměřováním, které dokáže určit polohu i po ztrátě proudu nebo prokluzu. Lze relativně snadno řídit a také je v porovnání ke svému výkonu velmi lehký.

Nakonec byl ovšem vybrán krokový motor. Jeho největší výhodou oproti servomotoru je několikanásobně nižší pořizovací cena. Momentová charakteristika ukazuje, že je také vhodný pro práci v nižších otáčkách. Nedisponuje sice absolutním odměřováním jako servomotor, ale jeho polohu jde odpočítávat, nebo lze dovybavit přídatným odměřovacím enkodérem. A celkově je pro použitou aplikaci naprosto dostačující. Konkrétně jde o motor *EMMS-ST-87-S-SE-G2* (příloha 10) od firmy FESTO v kombinaci s ovladačem *CMMT-ST-C8-1C-PN-S0* (příloha 11).



Graf 1: Momentové charakteristiky zvažovaných pohonů. Servomotor s ovladačem (vlevo), Krokový motor s ovladačem (uprostřed), Asynchronní motor (vpravo)

2.2 Hlavice

Hlavice je válcový díl připevněný z jedné strany na hřídel motoru a z druhé strany uzpůsobený pro upevnění konce namotávaného popruhu. Jejím základním prvkem jsou dva paralelní trny, které zajišťují „neprokluzování“ popruhu a namotávání do spirály. Tento zdánlivě jednoduchý díl byl nakonec jednou z nejsložitějších částí návrhu a to kvůli funkcím které musí plnit:

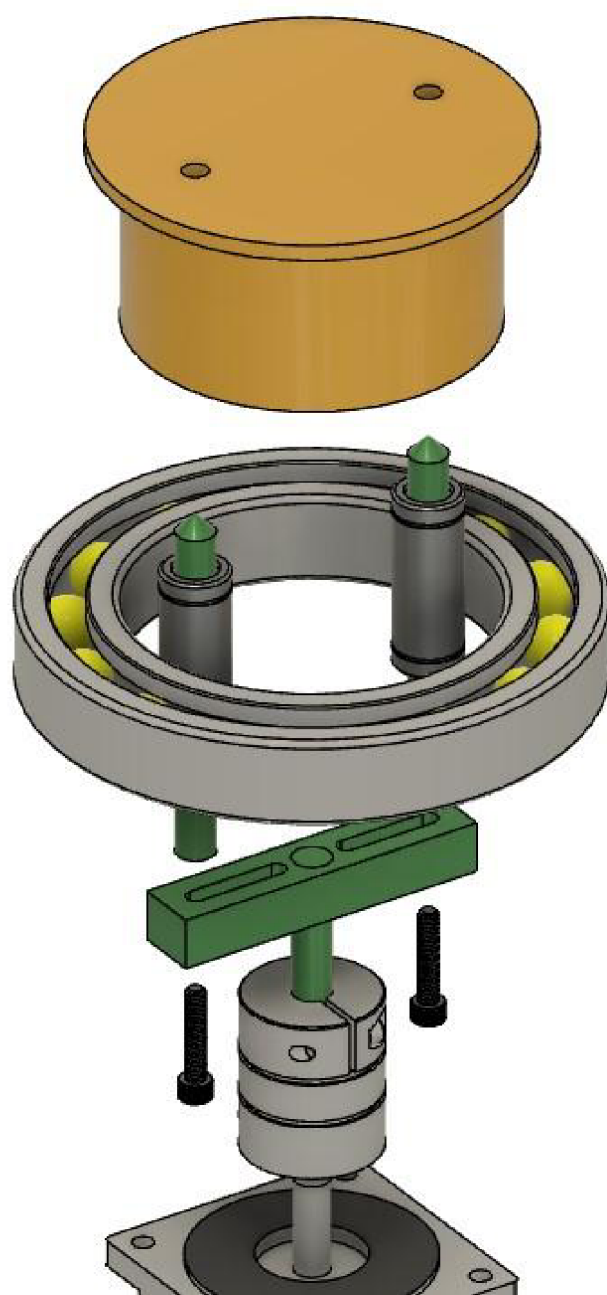
- Hlavice přenáší točivý moment z hřídele motoru na trny
- Trny se otáčejí centricky s hřídelí
- Rozteč trnů musí být jednoduše nastavitelná
- Trny se musí volně pohybovat ve svislém směru
- Popruh musí při zajetí trnů zůstat nerozmotán na desce stolu
- Síly během napínání nesmí být přenášeny přímo na motor, ani příliš namáhat hřídel

Prvotní návrh (obr. 3) byl konstrukčně velmi jednoduchý. Myšlenkou bylo, že se nebudou pohybovat pouze trny, ale celý motor i s hlavicí. Tento způsob by ovšem mohl zapříčinit zdeformování namotaného popruhu při zajetí trnů. Dále byla také veškerá síla v systému převáděna do interních ložisek motoru, která na to nejsou stavěná. V neposlední řadě nastavitelnost rozteče trnů byla značně omezená.



Obrázek 3: Prvotní návrh hlavice motoru

Nakonec se pro pohlcení síly použila velká jednořadá kuličková ložiska, která přenáší napětí do konstrukce stroje. Takto nejsou namáhána vnitřní ložiska motoru, která k tomu nejsou určena. Pro vedení trnů slouží pár lineárních ložisek umožňující hladký svislý i rotační pohyb. Jedinou nevýhodou navrženého řešení je to, že nelze nastavit rozteč lineárních ložisek, ale pouze trnů. V případě potřeby změny rozteče je tedy nutné vyměnit celou vnitřní vložku (oranžový vrchní díl) (obr. 4). Z tohoto důvodu je tento prvek koncipován na výrobu metodou 3D tisku, aby mohl být v případě potřeby levně, rychle a na míru vyroben přímo v provozu firmy.



Obrázek 4: Pokročilý návrh hlavice motoru

3 Brzdící ústrojí

3.1 Lineární vedení

Asi nejdiskutovanější zařízení celého stroje, které dlouho nebylo zcela jasné, bylo zařízení na „brždění“ namotávání. Mělo by to být lineární vedení, které by bylo schopno vyvíjet konstantní a zároveň nastavitelný odpor motoru navíjecího popruhu, a také mělo nastavitelné dorazy pro různou délku popruhů. Na začátku byly navrženy hned čtyři způsoby: pružina, řetěz nebo řemen s odporem (motor jako brzda), gravitační protizávaží, nebo pneumatický píst se škrťícím ventilem.

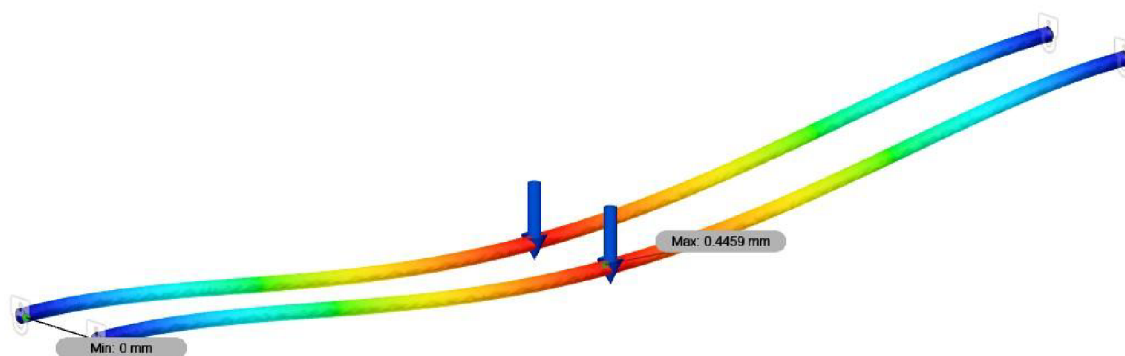
Pružina představovala velmi jednoduché a elegantní řešení, ale na rozdíl od ostatních zmiňovaných možností je špatně nastavitelná, a také na dráze dlouhé 125 cm je velmi obtížné zajistit lineární charakteristiku síly při natahování pružiny.

Řetěz hezky řeší problém konstantního odporu, jelikož převádí lineární pohyb na rotační, kde lze snadno připojit motor zajišťující brždění a snadný a pomalý návrat do původní polohy. Také elegantně řeší „sklouznutí“ popruhu v koncové poloze, kde se jednoduše přehoupne přes pastorek, přičemž nakloní dopínací trn a uvolní popruh. Nakonec byl ovšem vyřazen kvůli konstrukční složitosti.

Závaží má podobně jako řetěz konstantní odpor. Je velmi snadno nastavitelné. Dorazy lze snadno seřizovat pomocí šroubů. Jediný, ovšem velmi nepříjemný problém, je návrat do původní polohy, kde se veškerá hmota závaží a jezdce rozjede vysokou rychlostí zpět, až narazí do dorazu. Nárazy by bylo možné tlumit pomocí pneumatického tlumiče, ale kvůli tomu, a také kvůli potenciálně pro obsluhu nebezpečnému, rychle se pohybujícímu a nekrytému jezdci, byla nakonec zvolena jiná varianta.

Varianta pístu se z počátku nejevila jako příliš vhodná zejména kvůli vyšší ceně a také charakteristice odporu, která je značně nelineární a vyžaduje seřizování. Ale po konzultaci se zástupcem firmy FESTO, který se zaručil, že je k tomuto účelu píst vhodný a i běžně používaný, byl nakonec vybrán. Zároveň je pneumatický píst konstrukčně i co se týče řízení velmi jednoduchý.

Přestože píst má určitou robustnost a měl by do jisté míry vydržet na něj působící síly a točivé momenty, bylo nutné k němu přidat lineární vedení [6], které by pohlcovalo působení systému a zároveň prodloužilo životnost pístu. Nejprve v návrhu figurovala možnost vodících tyčí v kombinaci s lineárními ložisky. Simulací (obr. 5) bylo ověřeno, zda kvůli relativně dlouhé dráze nebude docházet k přílišnému průhybu uprostřed tyčí.



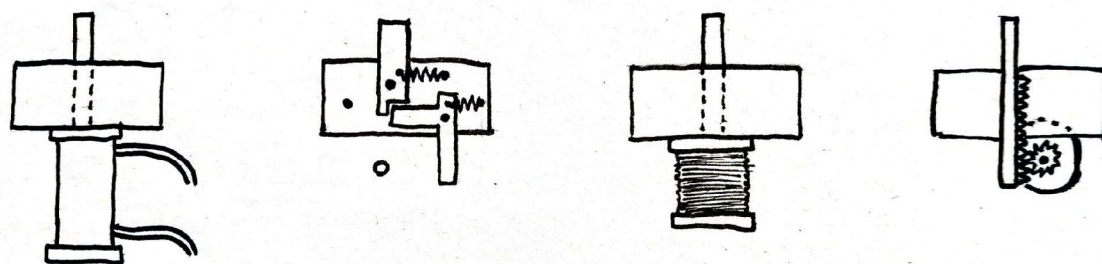
Obrázek 5: Simulace statického zatížení ocelových vodících tyčí o průměru 14mm

Statický průhyb vyšel jen nepatrný, nicméně při skutečném provozu by se hodnoty mohli velmi lišit, a celkově vodící tyče nejsou úplně vhodné řešení. Další možností bylo vedení pomocí kladek jezdících na k tomu uzpůsobenému profilu. Nakonec bylo pro jednoduchost zvoleno lineární vedení *DGC-25-1250* od firmy FESTO, což je píst i se zabudovanou kolejnicí s pojízdným kuličkovým vozíkem.

3.2 Uvolnění popruhu

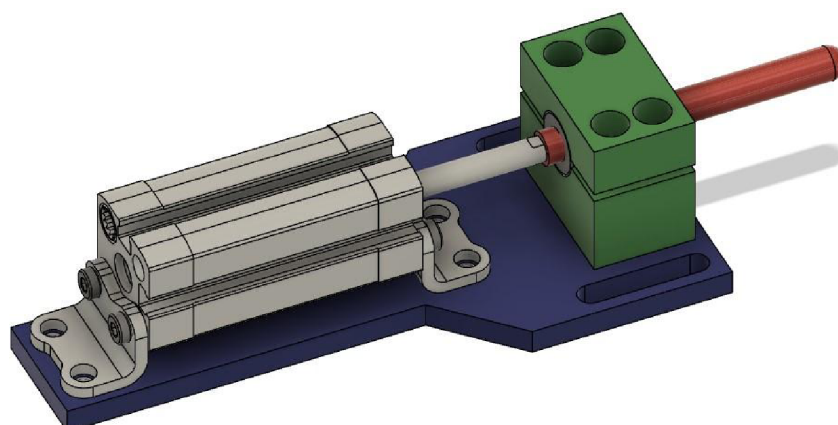
Po namotání popruhu je stejně jako u trnů motoru i u trnu brzdy nutné, aby po dokončení procesu zajel do stolu, a tím uvolnil výrobek pro další manipulaci. Zatímco u motoru byl vzhledem k jeho hmotnosti a charakteristice pohybu jasně zvolen způsob zasunutí - pneumatický píst, u trnu bylo možností znatelně více. Nabízí se způsob čistě mechanický, mechanismus podobný spoušti kuše, který by po najetí k dorazu uvolnil popruh a po vypuštění zaklapl do původní polohy pomocí pružiny (obr. 6). Další možností je elektronické uvolnění na bázi elektromotoru s

převodovkou nebo silného elektromagnetu. Elektromotor je zbytečně komplikované a nákladné řešení. Elektromagnet je oproti tomu velmi vhodný a i prostorově usporný, ale zase má velkou spotřebu proudu. Poslední možností je uvolnění pomocí pneumatického pístu nebo pneumatické kyvné jednotky. Ze všech výše zmíněných možnostech byl nakonec vybrán píst a to pro svou jednoduchost a nízkou cenu.



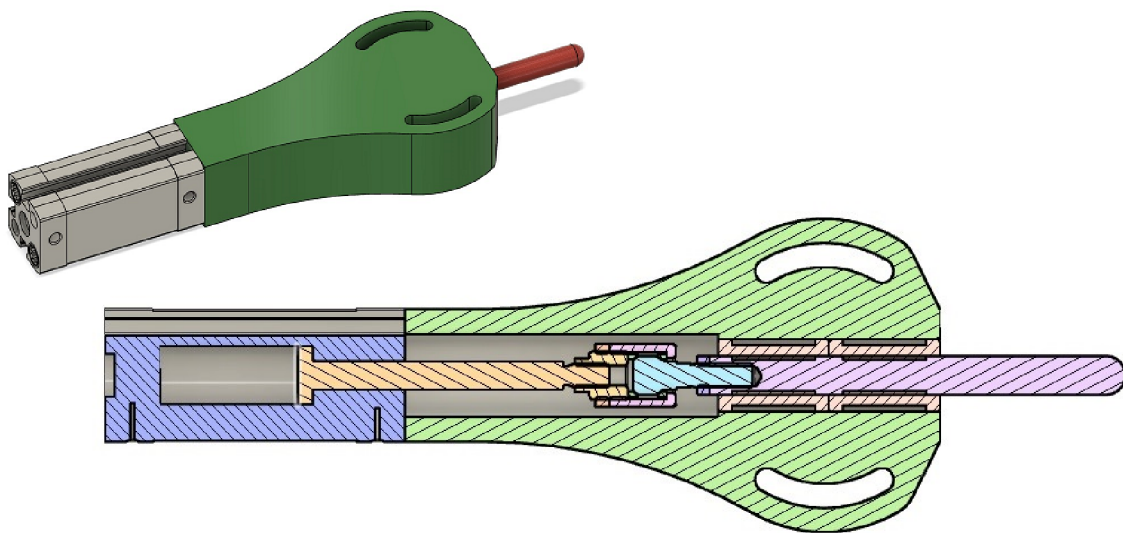
Obrázek 6: Zjednodušený náčrt způsobů zasunutí trnu. Zleva: pneumatický píst, pasivní mechanismus, elektromagnet, elektromotor s hřebenem

Dále bylo nutné přidat k pístu lineární vedení, aby silami v systému časem nedošlo ke zničení pístu. Jelikož je uvolňovací trn vysoustružen z kruhové tyče, nabízí se vedení pomocí lineárních ložisek.



Obrázek 7: Prvotní návrh dopínacího trnu

Na tomto obrázku (obr. 7) je zachycen první návrh dopínacího trnu s pístem. Trn je veden v lineárním ložisku *KH08-PP*, které je upevněno v pouzdře navrženém na míru. Tento návrh byl během procesu značně předělán (obr. 8). Bylo přidáno druhé ložisko, aby lépe pohlcovalo působící točivý moment. Byla přidána pružná spojka mezi trn a píst umožňující určitou volnost válci, což prodlužuje jeho životnost. Dále je nové pouzdro pouze z jednoho kusu, který lze jednoduše zhotovit pomocí 3D tisku. A také pouzdro obsahuje upravené kruhové drážky sloužící k upevnění a umožňující libovolné naklonění trnu v rozsahu -30° až $+30^\circ$.

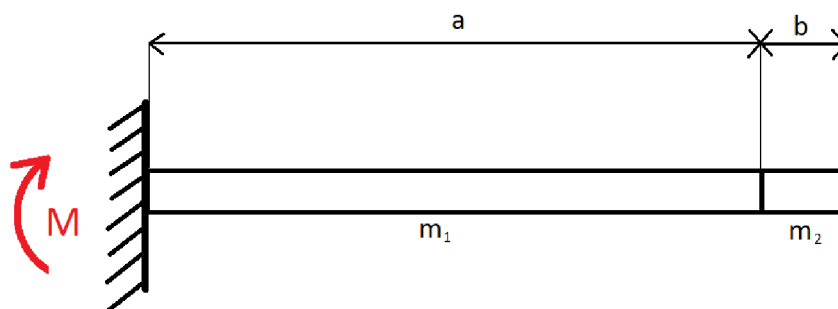


Obrázek 8: Pokročilý návrh dopínacího trnu

4 Balící ústrojí

4.1 Podavač

Podavač je jednoduchý prvek, jehož úkolem je dopravit smotaný popruh nejprve do páskovačky a poté do krabice. Skládá se ze dvou akčních členů, pístu pohybujícího ramenem a koncového chapadla. Problémem u našeho zařízení ovšem je, že páskovačka má tvar „tunelu“, což znamená, že je přístupná pouze zepředu a zezadu. Tato vlastnost vylučuje použití běžně [7] používaných podavačů ve výrobních strojích. Tyto manipulátory jsou buďto posazeny nebo zavěšeny na kolejnici, která jim umožňuje pohyb vpřed a vzad. To v tomto případě ovšem není možné, jelikož by kolejnice musela procházet branou páskovačky a znemožňovala by zpáskování výrobku. Místo toho bylo v tomto případě nutné navrhnout výsuvné rameno, které se vysune skrz bránu páskovačky až k navíjecím trnům, a po zasunutí zajede až za operační prostor. Samotná konstrukce tohoto systému není složitá, ovšem vyžaduje důkladnější spočítání parametrů [8] a robustnější návrh, jelikož dlouhé nepodepřené rameno způsobuje velké momenty síly působící na jeho základnu a také při rychlém pohybu může docházet k vibracím.

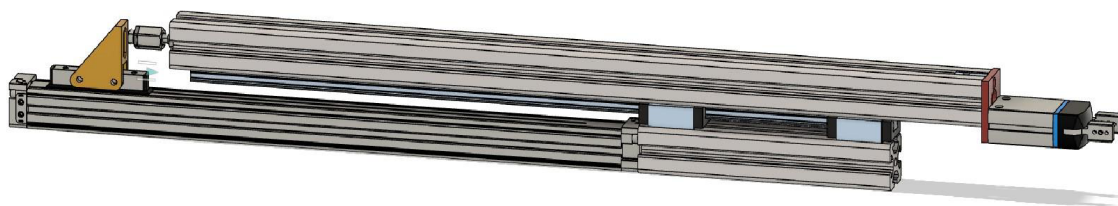


Obrázek 9: Výpočet momentu ramene plně vysunutě ruky

$$M = \frac{a}{2} \cdot g \cdot m_1 + \left(a + \frac{b}{2}\right) \cdot g \cdot m_2 \quad (2)$$

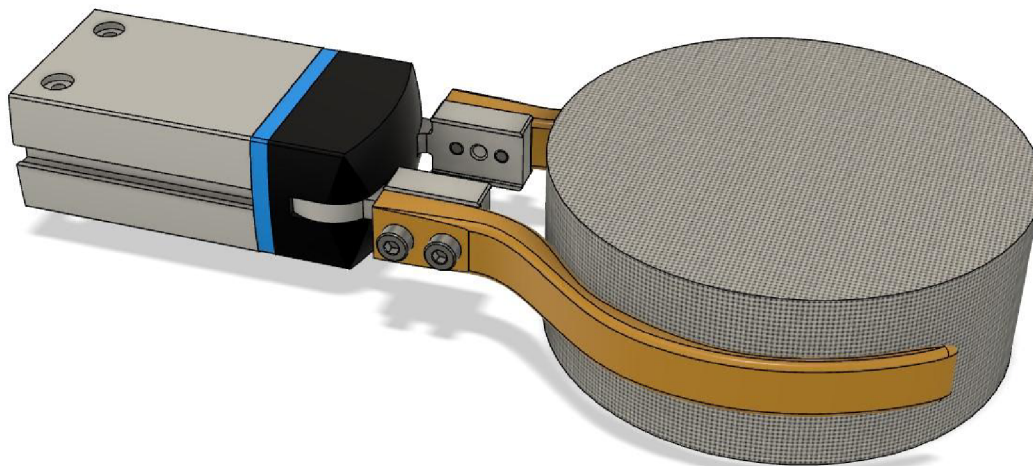
Písmeno m_1 vyjadřuje hmotnost hliníkového profilu a m_2 hmotnost chapadla na jeho konci (obr. 9)(2). Ze závislostí vyplývá, že hmotnost ramene by měla být co nejmenší, proto byl ke konstrukci zvolen odlehčený profil a chapadlo s nízkou hmotností.

Pro lineární pohyb byly nejprve navrženy kladky, po kterých se pohybovalo rameno s hlazenkovou tyčí, ale v průběhu návrhu byl koncept přepracován na použití lineárních vozíků pojíždějících na kolejnici. Tento způsob je sice dražší, ale na rozdíl od kladek jednodušší a také pevnější. Pro pohlcení momentu namáhající vedení a pro robustnější konstrukci zamezující vibrace byly navrženy dva vozíky s vzájemným rozestupem 15 cm (obr. 10). Pohyb celé ruky zajišťuje přímočarý pneumatický pohon FESTO DGC-K-18-400-PPV-A-GK s průměrem pístu 18 mm a silou 153 N, připojen k ramenu pomocí pružné spojky.



Obrázek 10: Rameno podavače s pístem a lineárním vedením

Výběr chapadla a zjištění potřebné síly bylo provedeno spíše pomocí experimentování než výpočtu, jelikož smotaný popruh se v realitě chová značně nestandardně. Nutnou podmínkou k výběru bylo, aby se jednalo o úhlové a ne lineární chapadlo, a aby mělo úhel otevření 180° . To z toho důvodu, aby po otevření nepřekáželo v páskování popruhu. Lopatky chapadla mají předpřipravené závitky na dva šrouby, kterými lze připevnit koncové packy (obr. 11). Ty bylo třeba vymodelovat, a budou vytvořeny pomocí 3D tisku. To z toho důvodu, aby se v případě potřeby během provozu daly lehce a rychle upravit, a rovnou vyrobit a vyměnit. Kdyby se ukázalo, že plastový materiál nemá dostatečné tření a popruh sklouzává, bude na packy ještě nalepen tenký proužek gumy.



Obrázek 11: Radiální chapadlo s plastovými packami

4.2 Páskovačka

Pro zpáskování namotaného popruhu je použito páskovací zařízení *ATS-MS 420S* [9](příloha 15) od firmy *ATS-Tanner Banding Systems AG*. Jde o kompaktní stolní páskovací stroj, používaný zejména k páskování papírovými nebo foliovými polypropylenovými páskami. Standardně jsou s ním baleny bankovky, obálky, vizitky nebo tiskoviny, ale dobře poslouží i k našim účelům. Tento stroj se běžně nepoužívá pro automatizovanou výrobu, nicméně disponuje jedním digitálním vstupem, který je možné zapojit do řídicího systému a ovládat pomocí PLC. Základní kapacita stroje je na 200 m pásky což by při odhadovaném použití 25 cm na jeden popruh mělo stačit na 800 popruhů. Poté obsluha musí vázací pásku manuálně doplnit.

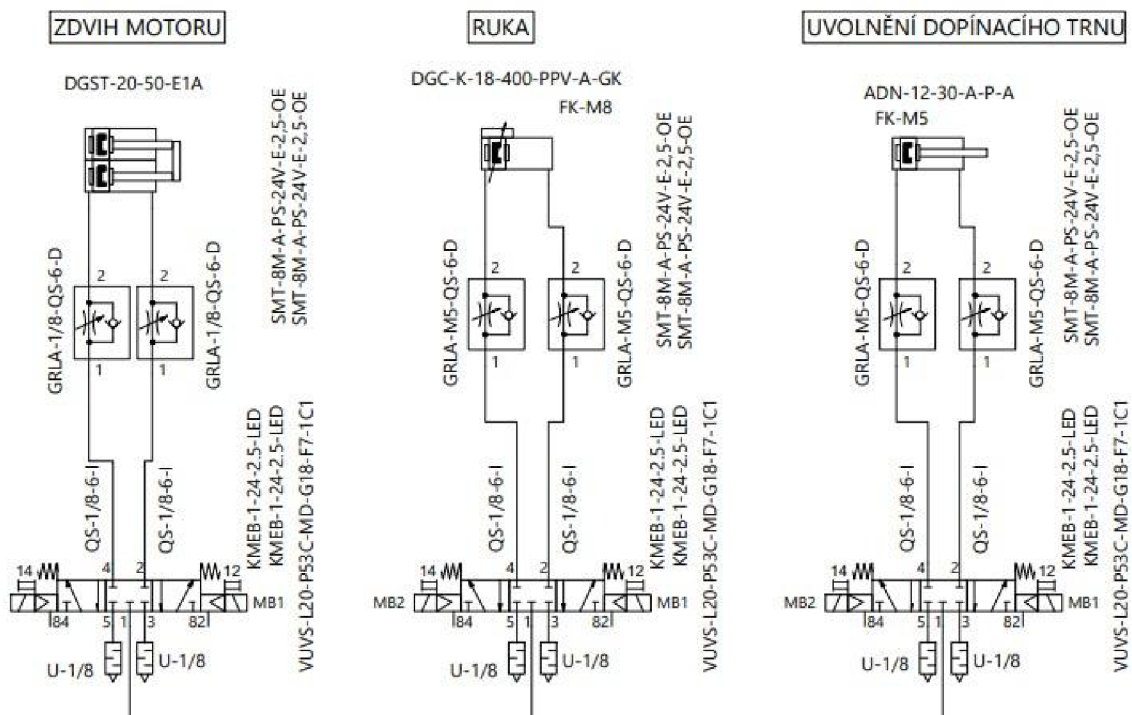
5 Pneumatické zapojení

Stroj je připojen k přívodu stlačeného vzduchu o tlaku 6 bar. Před vstupem do ventilů a pístů je vzduch prohnán přes v praxi běžně používanou [10] jednotku pro úpravu stlačeného vzduchu. Ta se v tomto případě skládá ze čtyř částí: regulátoru tlaku kterým lze jednotně upravit vstupní tlak do zařízení, filtru mechanických nečistot zamezující vstup prachových a jiných nežádoucích částic, odlučovače kondenzátu určený k odstranění kapalných částic, a maznice která přimazává procházející tlakový vzduch a přispívá k bezporuchovému chodu pístů. Upravený stlačený vzduch je dále veden do propojovací lišty, z které je již rozveden do jednotlivých ventilů.

Schémata zapojení ovládání pro první tři písty, zdvih motoru, ruku a uvolnění dopínacího trnu jsou totožná (obr. 12). Jedná se o dvojčinné pneumatické válce, což znamená, že jsou připojeny z obou stran a jejich zasunutí i vysunutí pohání stlačený vzduch. Oproti tomu jednočinné válce mají přívod tlakového vzduchu pouze z jedné strany a zpět do původní polohy je vrací pružina nebo jiná vnější síla. O ovládání se stará 5/3 elektromagnetický ventil (příloha 13) s uzavřenou střední hodnotou. To znamená, že má 5 vývodů, v našem případě napojených na: přívod vzduchu, přední stranu pístu, zadní stranu pístu, a dva odfuky. A má 3 možné polohy:

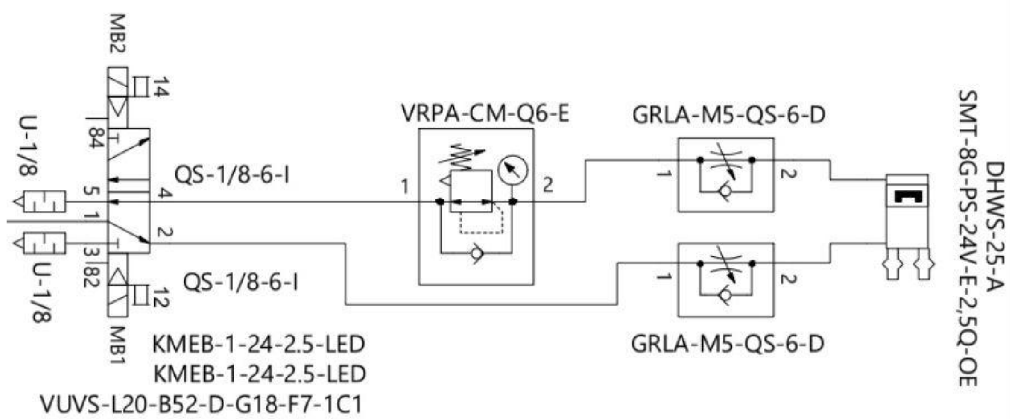
- uzavřeno
- přívod vzduchu do přední strany pístu, ze zadní odfuk
- přívod vzduchu do zadní strany pístu, z přední odfuk

Na jednotlivé polohy přepínají dva elektromagnety po stranách ventilu, řízené signály z PLC. Prvky v nákresu označeny jako U- $\frac{1}{8}$ jsou tlumiče hluku vyfukovaného vzduchu. Dále jsou z obou stran k pístu připojeny škrťací ventily se zpětným ventilem. Ty slouží k tomu, aby se dala regulovat rychlost průchodu stlačeného vzduchu a tudíž rychlost vysunutí a zasunutí pístu, a nastavují se při ladění a testování stroje.



Obrázek 12: Schémata zapojení ovládání pro první tři píсты

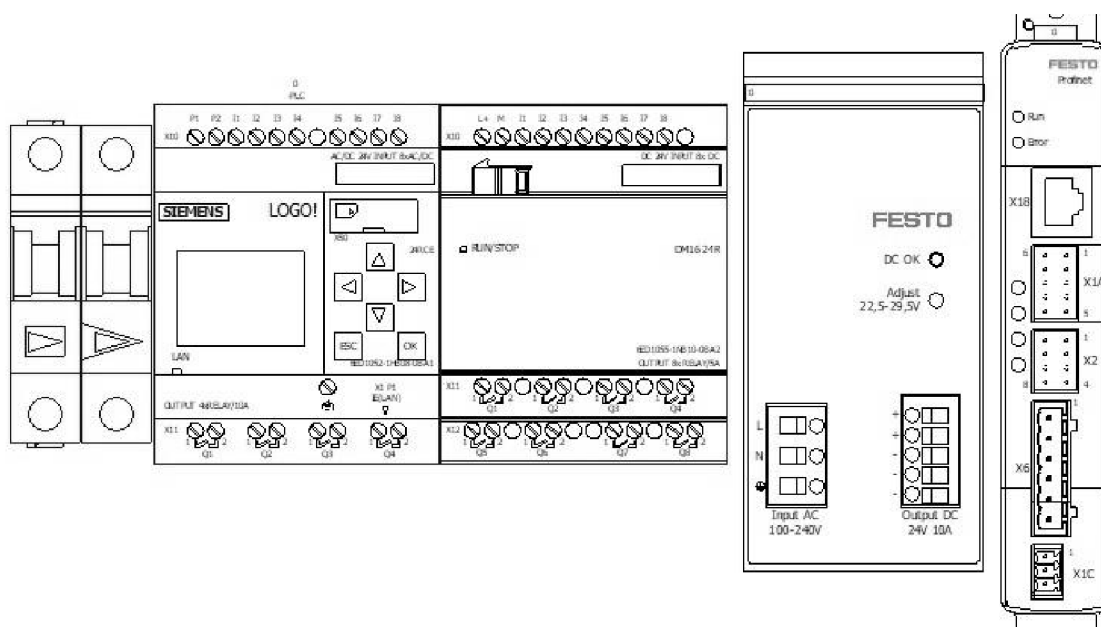
Konfigurace zapojení zbylých dvou válců je velmi podobná. Dlouhý píst sloužící k předpínání popruhu je ovládán stejným 5/3 elektromagnetickým ventilem, také obsahuje dva škrťací ventily se zpětným ventilem, ale navíc obsahuje regulátor tlaku s odvodušněním a zpětným ventilem (příloha 14), který slouží k tomu, aby se dal nastavovat tlak vzduchu, tudíž síla napnutí pístu. Zapojení chapadla, (obr. 13) stejně jako u dlouhého pístu, potřebuje regulátor tlaku k nastavení síly úchopu, ale je ovládáno pouze 5/2 bistabilním elektromagnetickým ventilem. To znamená, že ventil má pouze dvě polohy, v našem případě tedy: chapadlo otevřeno, chapadlo zavřeno. Důvodem pro použití dvou-polohového ventilu je, že u chapadla není třeba mezipoloha, a také je i celé zapojení jednodušší. Použití tohoto ventilu k chapadlu je i doporučeno firmou FESTO. Celé pneumatické schéma viz. příloha 3.



Obrázek 13: Schéma zapojení pneumatického chapadla

6 Elektrické zapojení

Stroj je napájen z klasického jednofázového vedení o napětí 230 V. Proud je nejprve veden přes elektrický vypínač, aby bylo možné stroj v případě potřeby jednoduše odpojit [11]. Dále je veden přes 16 A jistič EATON PL7-B16/1, kdyby došlo k nečekanému zkratu nebo poruše. A z jističe je připojen do zdroje (příloha 12), který poskytuje stejnosměrné napětí 24 V a 48 V pro sensoriku, pneumatické ventily a řízení stroje. Na obrázku (obr. 14) je znázorněno zapojení prvků ve skříni rozvaděče, zleva vypínač, jistič, PLC, přídatný modul PLC, zdroj napětí a úplně vpravo ovladač krokového motoru (příloha 4).



Obrázek 14: Nákres jednotlivých prvků v rozvaděči

Jádrem celého zařízení je řídicí PLC. V původním jednoduchém návrhu mělo být řízení řešeno pouze pomocí jednoduché sekvenční logiky s několika relé. Nicméně jak počet pístů a prvků během návrhu narůstal, bylo jasné, že bude potřeba použít programovatelnou řídicí jednotku. Volba padla na přání firmy na zařízení SIEMENS, jelikož s ním má již zkušenosti, tudíž bude lehčí ho zařadit do provozu. Konkrétně jde o řadu LOGO! (příloha 7), což je sice nejlevnější a nejnižší řada PLC od SIEMENS, nicméně disponuje všemi potřebnými funkcemi. Další velkou

výhodou je také jeho jednoduchost a velká rozšířenost, tudíž by neměl být problém s jeho naprogramováním, uvedením do provozu i následným servisem. V základu má LOGO! 8 vstupů, přičemž 4 mohou být použity i jako analogové, dále 4 digitální výstupy, ethernetový port sloužící k programování nebo připojení dalších zařízení, slot pro SD kartu, malý displej s tlačítky a slot pro připojení přídatných modulů.

V našem případě bude dále zejména kvůli ovládání velkého množství ventilů potřeba mnoho digitálních výstupů. Z toho důvodu bylo nutné PLC rozšířit o přídatný modul DM16 24R (příloha 8), který disponuje dalšími osmi digitálními vstupy a výstupy.

K ovládání jednotky přímo z ovládacího panelu na stroji slouží další zrozšiřující modul, LOGO! TDE (příloha 9). Jde o malý panel s několika tlačítky a displejem. Tento displej by měl sloužit k zobrazení počítadla již zpáskovaných popruhů, a také se by se na něm měly dát pomocí tlačítek měnit jednotlivé předpřipravené programy na namotávání různých typů popruhů.

Na řídicí PLC je napojeno celkem dvanáct výstupů a čtrnáct vstupů. Deset DO slouží k ovládání pěti párů elektromagnetů na každém z pneumatických ventilů (příloha 6). Když PLC pustí napětí do jednoho elektromagnetu, píst se vysune, pokud do druhého, píst se zasune. Další DO je napojen na páskovačku, kde je PLC vysláním signálu schopné zapnout páskovací proces. Poslední výstup vede k LED diodě podsvícení tlačítka START, tak aby obsluha věděla, že stroj je připraven ke spuštění.

Deset DI je připojeno na magnetické spínače SMT-8M-A-PS-24V-E-2,5-OE (příloha 5). Jde o čidla firmy FESTO která jsou kompatibilní s vybranými písty, a pomocí jednoho šroubku je lze snadno uchytit do připravené drážky, nebo jednoduše posouvat. Tato čidla slouží k tomu, aby PLC mělo informaci, ve které krajní poloze se píst nachází. U dlouhého brzdícího pístu je třeba zastavovat v různých vzdálenostech, aby stroj najel do správné polohy i pro různě dlouhé popruhy. Nejprve bylo v plánu odměřovat vzdálenost pomocí analogových optických senzorů nebo pomocí „motion terminalu“. Tato řešení jsou sice elegantní a multifunkční, ale nakonec byla pro jednoduchost a nižší cenu použita stejná digitální čidla jako u ostatních pístů. Při změně délky popruhu tedy obsluha musí

čidla manuálně posunout, což ale není problém, vzhledem k tomu, že operace trvá srovnatelně dlouho jako přepnutí programu na PLC. Navíc se délka popruhu mění jen málokdy.

Další tři digitální vstupy vedou do ovládacího panelu stroje a jsou připojeny k tlačítkům START, STOP a RESET. Tlačítko START je typu NO. To znamená, že je normálně otevřené, a až při stisknutí propojí kontakty. To z toho důvodu, aby dojde-li k jeho poruše, stroj nešel spustit. Tlačítko RESET je totožné s tlačítkem START, pouze není podsvícené. Třetí tlačítko STOP je typu NC, aby se v případě jeho poruchy stroj zastavil. Také jde o tlačítko s aretací, tudíž po jeho zmáčknutí zůstane stisknuté, a opětovné uvolnění musí provést obsluha.

Poslední DI je připojen k čidlu na bezpečnostním krytu stroje. Ten slouží k tomu, aby došlo k okamžitému zastavení stroje v případě, že je kryt otevřen během procesu namotávání. Ze stejných důvodů jako u STOP tlačítka jde o typ NC.

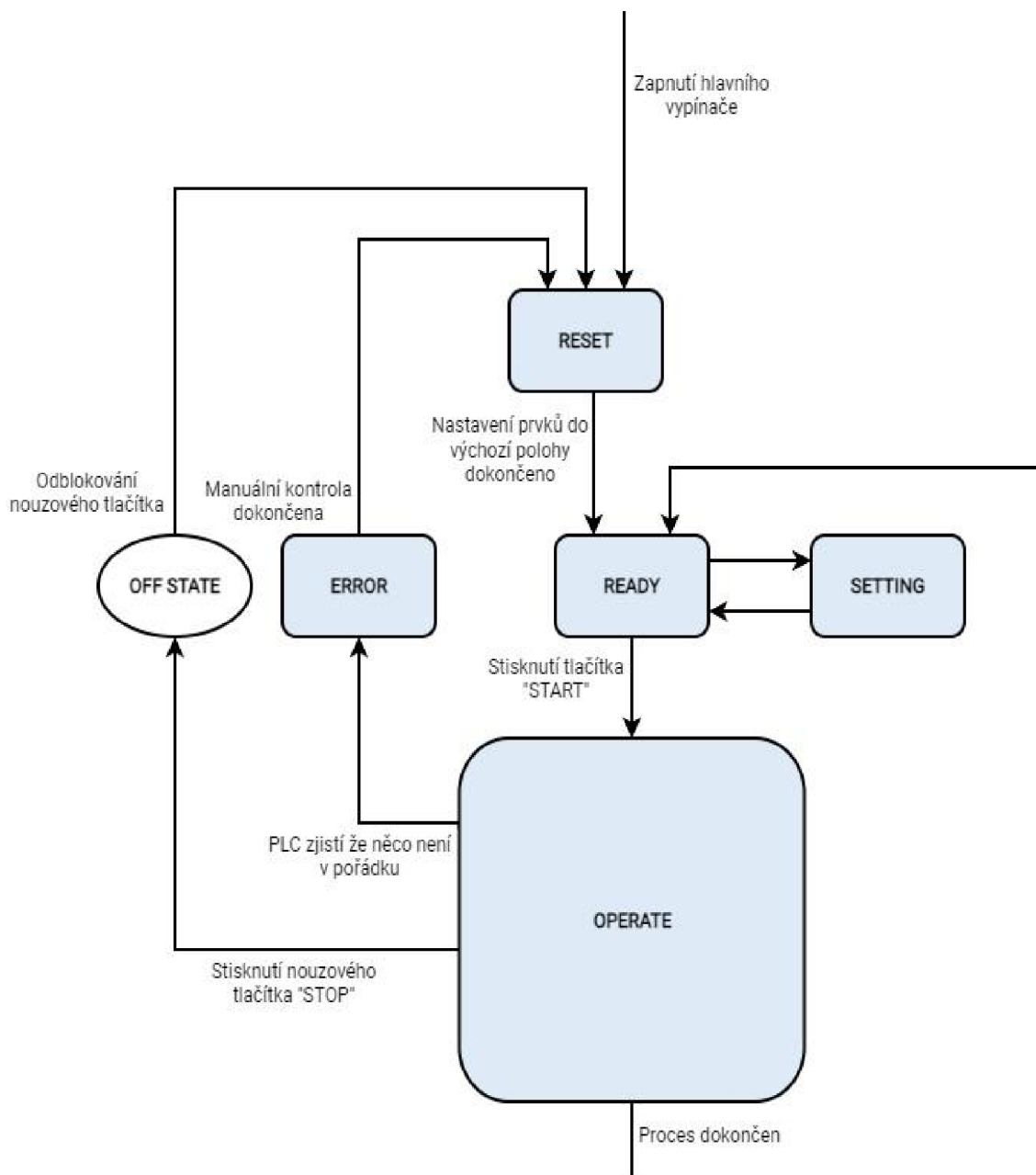
7 Řídící software

Vytvoření finálního řídicího softwaru hotového zařízení nebylo mým úkolem, jelikož si na to firma najala profesionálního programátora. Nicméně součástí zadání této práce je vytvoření řídicího algoritmu [12]. V této kapitole tedy nebudu popisovat hotový kód ovládající zařízení, ale spíše obecnější princip řízení a algoritmus samotný.

Řízení celého stroje je prováděno pomocí „Stavového automatu“ [13]. Jde o princip řízení, kdy má stroj jednotlivé pevně definované stavy, mezi kterými za jasně definovaných podmínek přechází. Zároveň se nikdy nemůže nacházet mimo něj, v nedefinovaném stavu, nebo ve více stavech najednou. Každý tento stav, má pevně danou podmínku do jeho vstupu, pevně definované podmínky pro jeho opuštění, a operace co se v něm odehrávají (jeho funkci). V našem případě bylo v hlavní řídicí smyčce stroje těchto stavů celkem šest.

- RESET - Stroj nastaví píсты a motor do startovní pozice
- READY - Stroj je připraven a čeká na příkaz obsluhy k nastavení nebo spuštění
- SETTING - Stroj je v klidu a obsluha může provádět nastavení rychlosti motoru, počítání vyrobených kusů a další...
- OPERATE - Stroj je v procesu výroby a postupuje podle naprogramované sekvence jednotlivých operací
- ERROR - Stroj detekoval chybu nebo selhání některého z prvků, zastavil, a nyní čeká na provedení kontroly obsluhou a pokyn k pokračování
- OFF STATE - Došlo k nouzovému zastavení, stroj zablokoval pohyblivé části, přerušil provoz, a čeká na provedení resetu

Přičemž stavy SETTING a OPERATE mají v sobě vnořené další podřízené stavové automaty. Uspořádání jednotlivých stavů je znázorněno na obrázku (obr. 15).

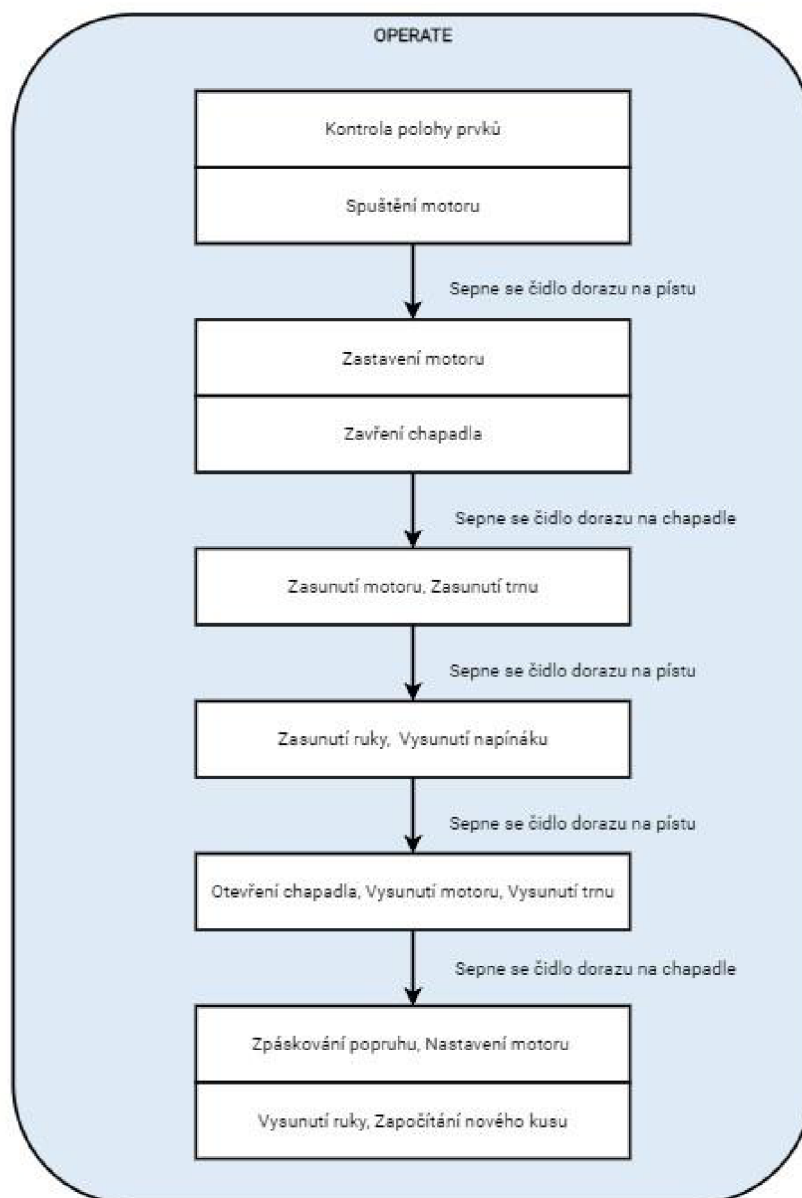


Obrázek 15: Diagram struktury řídicího programu PLC

Program po zapnutí nejprve spadne do stavu RESET. Zde zkontroluje, zda jsou jednotlivé prvky stroje na správném místě. Pokud nejsou, ujistí se zda je zavřen bezpečnostní kryt motoru, a následně prvky nastaví a počká na dokončení operace. Poté přepne do stavu READY. V tomto stavu stroj „hibernuje“ a pouze čeká na příkaz od obsluhy. Obsluha může na displeji přejít do nastavení (SETTING) a upravit zde rychlost nebo počítání vyrobených kusů. Po stisku tlačítka START stroj

opět zkontroluje, zda je uzavřen bezpečnostní kryt motoru, a následně přepne do stavu OPERATE. V tom běží další, podřízený stavový automat. Jeho diagram je znázorněn na obrázku (obr. 16). Program nejprve opětovně zkontroluje správnou polohu všech částí stroje před spuštěním. Po dokončení kontroly zapne motor a začne namotávat popruh. Když dojde k sepnutí koncového čidla brzdícího pístu, zastaví motor. Po zastavení sevře chapadly namotaného šneka, a následně po sepnutí čidla pístem zasune motor s trny a dopínací trn. Když prvky zajedou do stolu, uvede se do pohybu podavací ruka, a přesune výrobek do páskovačky. Paralelně s tím proběhne i opětovné nastavení dopínacího trnu do výchozí polohy. Poté chapadlo uvolní popruh a ihned po uvolnění je šnek zpáskován. Ve stejnou dobu se vysunou trny, aby mohly být připraveny pro upnutí nového popruhu. Po zpáskování se pomalu začne vysouvat ruka, přičemž sesune hotový výrobek ze stolu, a ten propadne dolů do krabice. Zároveň program započítá dokončení dalšího kusu. Po provedení všech těchto operací program opustí stav OPERATE a přeskočí opět do stavu READY, kde čeká na nový cyklus.

Poslední dva stavy ERROR a OFF STATE nejsou za normálního provozu vůbec použity. ERROR je stav, kam stroj automaticky spadne, detekuje-li v kterýkoliv okamžik procesu výroby, že něco není v pořádku. To může být například porucha jednoho z čidel nebo ventilů. Do stavu OFF STATE stroj přejde, dojde-li k nouzovému zastavení stroje. Tedy po stisku STOP tlačítka nebo otevření bezpečnostního krytu. Pro opuštění obou těchto stavů musí obsluha manuálně provést pokaždé trochu jiné operace k uvedení stroje opět do stavu RESET a provozu.

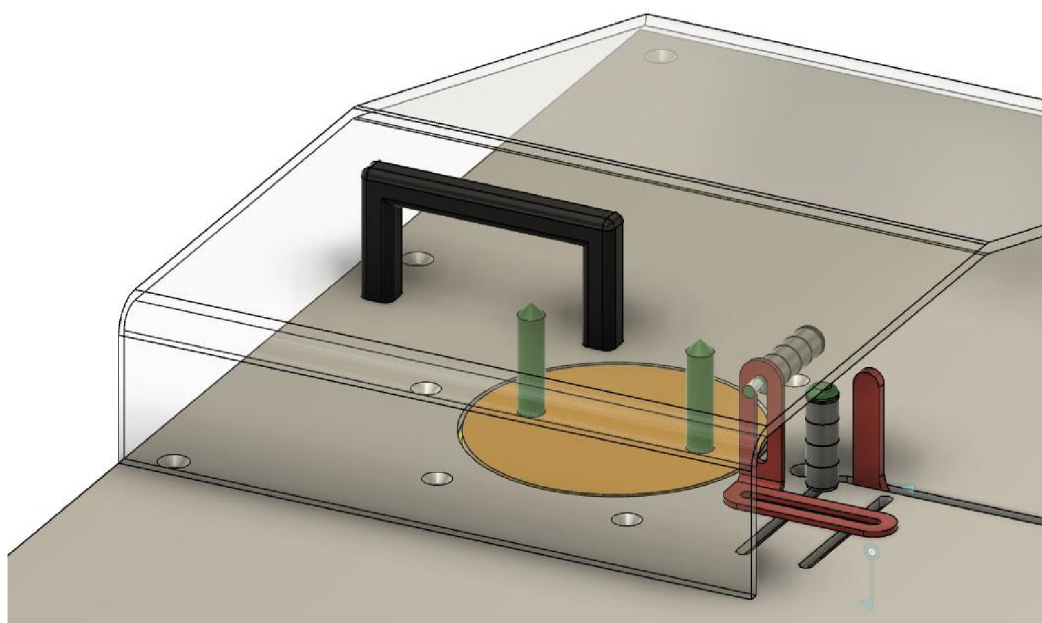


Obrázek 16: Diagram programové výrobní sekvence

8 Bezpečnost

Pro uvedení stroje do provozu bylo nutné zajistit, aby chod stroje byl bezpečný pro obsluhu, ale i pro okolní zařízení. Při určování nebezpečí bylo postupováno podle technické normy ČSN EN ISO 12100 [14]. Jako nejkritičtější v našem případě vyšla mechanická nebezpečí, konkrétně pohybující a rotující prvky, a elektrická nebezpečí. Následky ostatních druhů nebezpečí jsou spíše zanedbatelné.

Základním prvkem ochrany obsluhy před zraněním bylo upravení a návrh části tak, aby se minimalizovala možnost kontaktu pohyblivých částí stroje s částí těla obsluhy. Nejnebezpečnějším prvkem stroje je bezesporu motor. Dva excentrické trny namotávající popruh, mohou stejně tak začít nechtěně namotávat i například část oděvu obsluhy. Proto je přes celé namotávací ústrojí umístěn plexisklový kryt (obr. 17). Ten by měl zabránit jakémukoli přímému kontaktu s rotujícími částmi. Další potenciálně rizikovou částí je dlouhý brzdící trn. Bohužel jeho plné zakrytí by velmi zpomalovalo provoz, tudíž byl pouze zpomalen jeho pohyb, a vůle mezi prvky byly upraveny, aby se mezi ně nemělo nic zaseknout.



Obrázek 17: Bezpečnostní kryt rotující části stroje

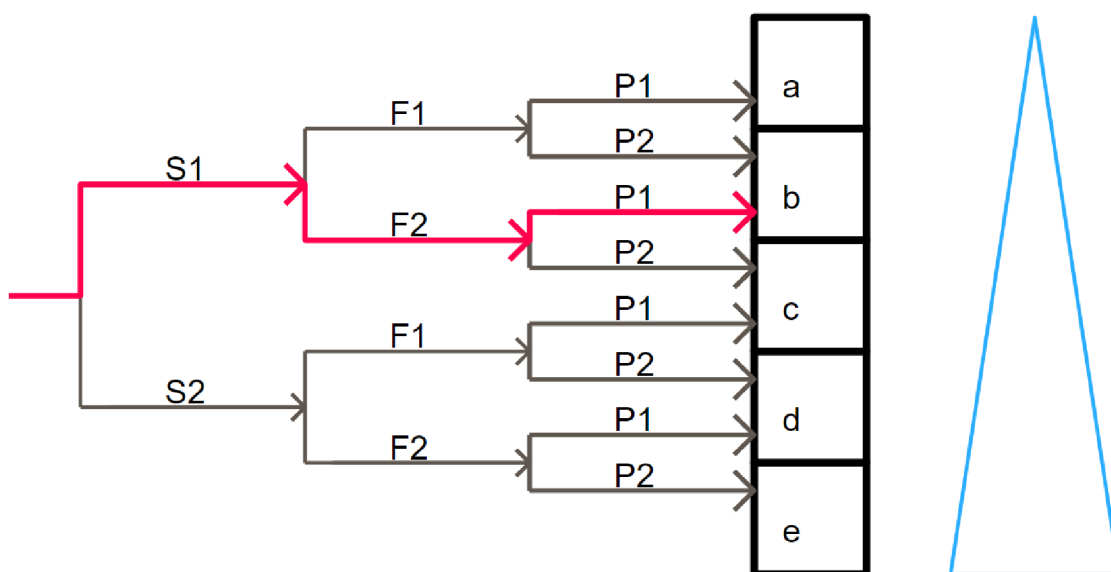
Kromě mechanického uzpůsobení návrhu pro bezpečnější provoz, bylo také nutné uzpůsobit návrh elektrického zapojení stroje. Základní bezpečností součástí, kterou musí disponovat každé podobné elektrické zařízení, je jistič. Jeho funkce je, že vypne přívod proudu, pokud dojde ke zkratu nebo přetížení systému. Tím zabraňuje poškození elektroniky, možnosti vzniku požáru, nebo úrazu elektrickým proudem. V našem případě je použit 10 A jistič se spouštěcí charakteristikou B. Dalším nezbytným elektrickým prvkem ochrany je bezpečnostní STOP tlačítko a čidlo krytu. Při jejich sepnutí dojde k okamžitému zastavení motoru a všech dalších pohyblivých částí stroje. Jejich zapojení nemůže jít, stejně jako u všech ostatních digitálních vstupů, nejprve do jednotky PLC, kde by byl signál zpracován a následně softwarově jednotlivé pohyblivé prvky zastaveny. To z toho důvodu, že použité PLC LOGO! není „bezpečnostní“ tj. není dostatečně robustní a spolehlivé, aby mohlo provádět tak nezbytnou funkci. Vývody tlačítka tedy vedou přímo k STO pinu ovladače motoru, který dostatečnou bezpečnost na rozdíl od PLC splňuje, a k elektromagnetickému ventilu, který při stisknutí vypne přívod stlačeného vzduchu. Samotné tlačítko je typu NC, aby došlo k zastavení například i při rozpojení kabelu, a jde o tlačítko s aretací, aby po zmáčknutí zůstalo stisknuté až do odblokování. Také je umístěno přímo před místem obsluhy a má výraznou červenou barvu, aby v krizové situaci mohla obsluha zareagovat co nejrychleji.

Samotný software obsahuje, pro lepší zajištění bezpečnosti, kontrolu stavu stroje, aby dokázal detekovat poruchu a zamezil nestandardnímu chování systému. Jde o jednoduchý script, který během provozu stroje kontroluje, zda nejsou sepnuté sensory na obou koncích pístu. To by totiž znamenalo poruchu jednoho z nich. Dále sleduje, jestli nejsou oba nesepnuté v klidovém stavu. A také jestli nejsou naráz otevřené protichůdné ventily na stejném pístu. Pokud dojde k některému z těchto nestandardních jevů, software stroj preventivně zastaví, a přepne do stavu ERROR, kde čeká na kontrolu a potvrzení od obsluhy.

Posledním bodem pro zamezení vzniku úrazů, poškození a poruch na zařízení je podkladová dokumentace a proškolení obsluhy. Během procesu návrhu vznikly výkresy strojních součástí i schéma elektrického a pneumatického zapojení. To vše se dá použít k nastudování fungování stroje a následnému bezpečnému

provozu i servisu. Také by ve firmě před uvedením do provozu měl vzniknout manuál k celému zařízení a veškerým na něm prováděným operacím.

Po dokončení návrhu byla provedena analýza rizik podle technické normy ČSN EN ISO 13849-1 [15]. Hodnota požadované úrovně bezpečnosti PL spadla do kategorie b (graf 2). To podle převodní tabulky odpovídá kategorii 1 ve stupnici SIL. V takovém případě ještě není nutné opatřit stroj externím bezpečnostním systémem, pouze je požadováno volit osvědčené komponenty které mohou odolávat očekávaným vlivům, a musí být použity základní bezpečnostní zásady



graf 2: Graf pro určení požadované PL

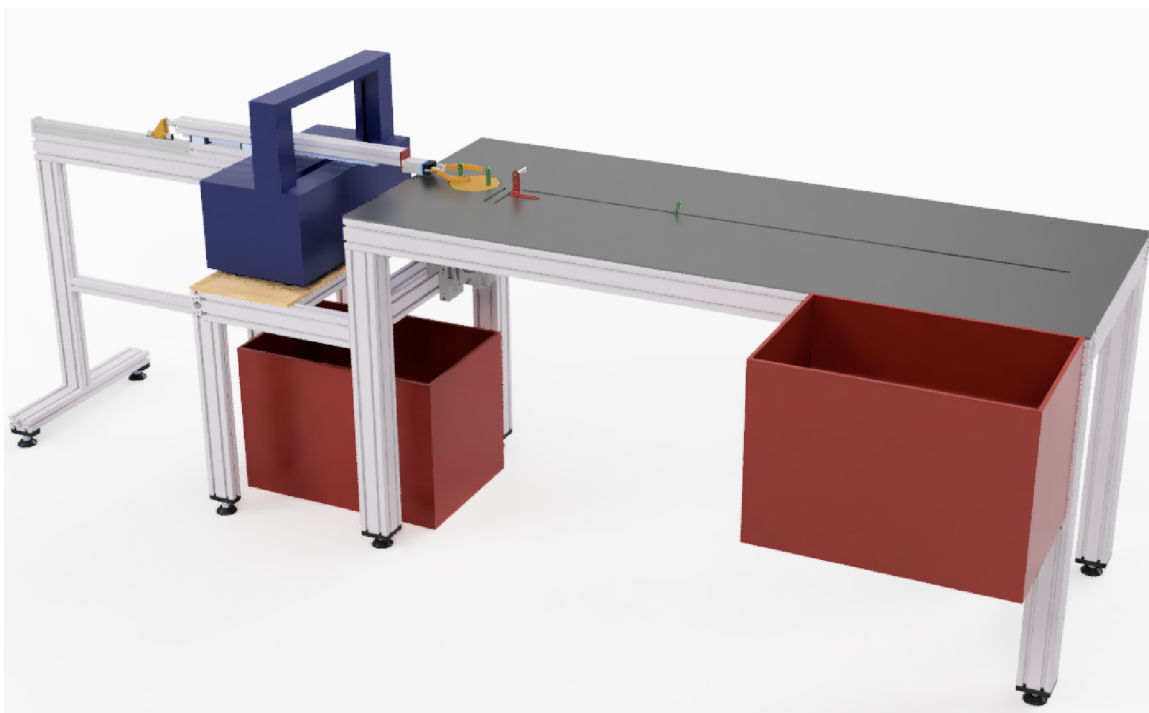
Legenda

- S závažnost zranění
- S1 lehké zranění
- S2 těžké zranění
- F četnost vystavení nebezpečí
- F1 řídká až málo častá nebo krátká doba vystavení
- F2 častá až nepřetržitá nebo dlouhá doba vystavení
- P možnost vyloučení nebezpečí
- P1 možné za specifických podmínek
- P2 sotva možné

Závěr

Cílem této práce bylo představit proces návrhu automatického páskovacího stroje, představit hotové navržené zařízení, a popsat, proč byla zvolena jednotlivá konstrukční řešení. V první části bylo definováno, jak by mělo zařízení vypadat, jak by mělo fungovat a jaké jsou jednotlivé požadavky firmy. Následovalo několik kapitol zabývajících se mechanickou konstrukcí klíčových funkčních prvků stroje a výběrem vhodných dílů a akčních členů. Dále bylo představeno zapojení jednotlivých pneumatických prvků a jejich funkce. Bylo popsáno elektrické schéma nízkého napětí včetně zapojení řídicího PLC, jeho přídatných modulů, vstupů a výstupů. Na závěr práce byl popsán řídicí algoritmus stroje a jednotlivé bezpečnostní prvky.

Nakonec se podařilo navrhnout řešení, které by splňovalo požadavky firmy na bezpečnost, funkčnost, cenu a jednoduchost. Byla vyhotoven 3D model zařízení (obr. 18), elektrotechnická dokumentace, pneumatické výkresy i návrh softwaru.



Obrázek 18: Renderovaný model hotového zařízení

Výsledný stroj má rozměry 300 x 72 x 115 cm a hmotnost přibližně 260 kg. Jeho provoz by měl být relativně bezúdržbový. Maximální příkon zařízení by neměl překročit 3,5 kW. V tabulce (Tabulka 1) jsou vypsány základní parametry stroje.

Tabulka 1: Základní parametry stroje

Napěťová soustava	1NPE 230V, 50Hz
Příkon	3,5 kW (max.)
Krytí	IP40 / IP20
Hmotnost	cca 260 kg
Rozměry rámu	300 x 72 x 115 cm
Řídící napětí	24V DC

Jednotlivé komponenty pro budoucí realizaci budou opatřeny ze tří zdrojů. Přímého katalogového nákupu, to platí zejména pro pneumatické prvky od firmy Festo a hliníkové profily ITEM. Prvky jako například deska stolu nebo ocelové trny budou vyrobeny na zakázku. A některé části jako třeba packy chapadla nebo pouzdro ložisek si firma zvládne zhotovit sama. Jedním z požadavků bylo, aby hotové zařízení bylo co nejlevnější. V následující tabulce je uvedena přibližná odhadovaná cena jednotlivých komponent (Tabulka 2).

Tabulka 2: Odhadované ceny komponentů stroje

Hliníková konstrukce stolu	70.000,-
Pneumatika, příslušenství	63.000,-
Motor, ovladač, příslušenství	20.000,-
Páskovačka	42.000,-
Zdroj, řízení, sensorika, jištění	19.000,-
Deska, díly na míru	14.000,-
Ostatní	7.000,-
CELKEM	235.000,-

I když firma má v plánu v co nejbližším čase stroj vytvořit, bohužel v době odevzdání této práce ještě proces výroby nezačal. Následující kroky ke konečné realizaci tedy jsou: nejprve objednat, zadat k výrobě a vyrobit jednotlivé komponenty, následně sestavit stroj jako skládačku podle hotového 3D modelu, dále naprogramovat PLC a propojit elektrické prvky zařízení, a nakonec přichází fáze testování, ladění a nastavení parametrů. Po dokončení a zaškolení obsluhy bude stroj připraven k provozu.

Už během procesu návrhu se objevovaly další možné budoucí modifikace stroje pro jednodušší provoz nebo lepší funkci. Jednou z nich nepochybně může být přidání držáků beden. Jedna bedna slouží k přinesení nenamotaných popruhů, a mohla by být pevně přidělána ke stolu hned po pravé straně obsluhy, aby ji měla hned po ruce tak, jak je zobrazeno na obrázku (obr. 18). Druhá bedna sloužící na skladování hotových kusů by zase mohla být na pojízdném vozíku pro snazší manipulaci pod stolem. Další možnou přídatnou úpravou by také mohla být klec nebo ochranný plexisklový kryt kolem celé zadní části stroje. Obsluha zde nepotřebuje mít přístup, a eliminuje se tím riziko kontaktu s pohybující-se rukou stroje.

Jelikož na tak specifickou výrobní operaci jako je automatické namotávání popruhů do tlumičů pádu, co se stroje i procesu namotávání týče, neexistují v podstatě žádné materiály, z kterých by se dalo čerpat, může tato práce a přidružená vypracovaná dokumentace být nepochybně přínosem pro někoho, kdo by se v budoucnu pokoušel navrhnout zařízení k podobnému účelu. Jednotlivé konstrukční řešení, myšlenky a slepé uličky mohou zároveň také pomoci při případném upravení stávajícího řešení nebo vytvoření novější verze stroje.

Osobně pro mě tato práce byla přínosem zejména v tom, že jsem mohl nahlédnout, jak probíhá konstruování podobného zařízení v praxi. Prošel jsem proces návrhu od úplného začátku, přes vymýšlení samotného konceptu fungování, až po výběr konkrétních komponent a řešení provozní bezpečnosti. Také jsem měl možnost potkat se a diskutovat s několika zajímavými a inspirativními lidmi. A v neposlední řadě jsem se zdokonalil zejména v tvorbě 3D modelů, ale také v práci s dalšími návrhovými softwary.

Seznam literatury

- [1] SINGING ROCK [online]. Singing Rock, s.r.o., 2021 [cit. 2021-11-27].
Dostupné z: <https://www.singingrock.cz/>
- [2] FESTO - katalog produktů [online]. Festo, s.r.o., 2021 [cit. 2021-11-27].
Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/products
- [3] ITEM - katalog produktů [online]. Item Industrietechnik GmbH, 2021
[cit. 2021-11-27]. Dostupné z:
<https://cz-product.item24.com/cs/katalog/products/mb-building-kit-system-1001009411/>
- [4] FUSION 360 [online]. Autodesk, Inc., 2021 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z:
<https://www.autodesk.cz/products/fusion-360/overview>
- [5] SOUČEK, Pavel. Servomechanismy ve výrobních strojích. Praha:
Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02902-6.
- [6] REBHÁN, David. Experimentální ověřování statických vlastností valivého
lineárního vedení pro obráběcí stroje. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT
v Praze, Fakulta strojní.
- [7] SKAŘUPA, Jiří. Průmyslové roboty a manipulátory. Ostrava: Ediční středisko
VŠB – TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [8] ŠREJTR, Josef a Oldřich BRŮHA. Technická mechanika: statika. Praha:
Nakladatelství technické literatury, 1970. Řada teoretické literatury.
- [9] ATS-MS 420S: páskovací stroj [online]. ATS-Tanner Banding Systems, 2022
[cit. 2022-01-20]. Dostupné z:
<https://www.ats-tanner.com/en/banding-machines/ms-420s-1601>
- [10] HAJDUK, Mikuláš. Základy pneumatických mechanismů I. Košice:
Technická univerzita v Košicích, 2013. ISBN 978-80-553-1605-5.
- [11] BERKA, Štěpán. Elektrotechnická schémata a zapojení v praxi. Brno:
Computer Press, 2015. ISBN 9788025145982.
- [12] BALÁTEĚ, Jaroslav. Automatické řízení. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN, 2004.
ISBN 978-80-7300-148-3.

- [13] VAIS, Václav. Teoretická informatika 1. část: Konečné automaty a regulární jazyky. Plzeň: KIV/ZČU, 2017.
- [14] ČSN EN ISO 12100: Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [15] ČSN EN ISO 13849-1: Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 1: Všeobecné zásady pro konstrukci. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

Seznam příloh

1. Ferratový tlumič pádu SINGING ROCK PHARIO 360
2. Namotaný popruh uvnitř látkové kapsy tlumiče pádu
3. Schéma pneumatického zapojení stroje
4. Zapojení rozvaděče
5. Elektrické zapojení vstupů digitálního modulu PLC
6. Elektrické zapojení ventilů a digitálního modulu PLC
7. LOGO! PLC
8. LOGO! DM16 24R
9. LOGO! TDE
10. Krokový motor
11. Ovladač motoru
12. Zdroj napětí
13. Elektromagnetický ventil VUVS-L20-P53C-MD-G18-F7-1C1
14. Redukční ventil VRPA-CM-Q6-E
15. Páskovací zařízení ATS-MS 420S

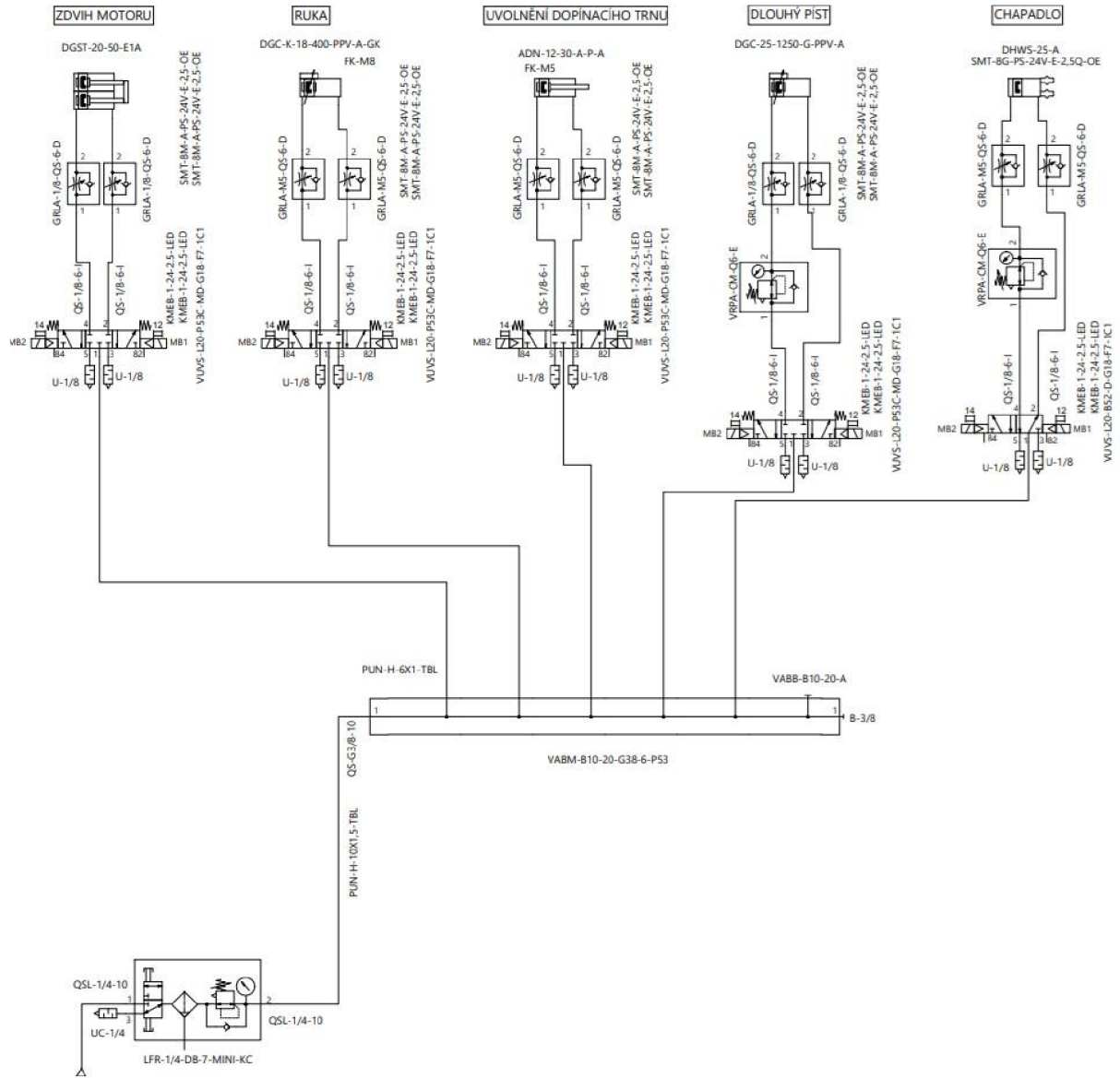
Přílohy



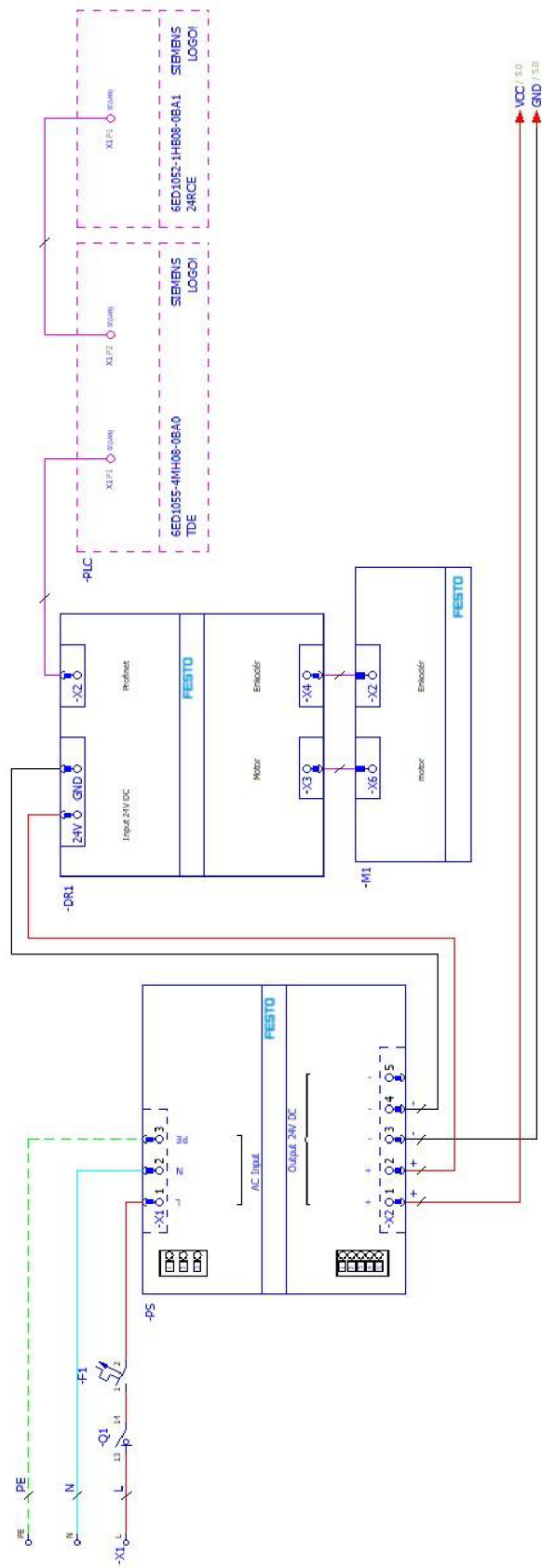
Příloha 1: Ferratový tlumič pádu SINGING ROCK PHARIO 360



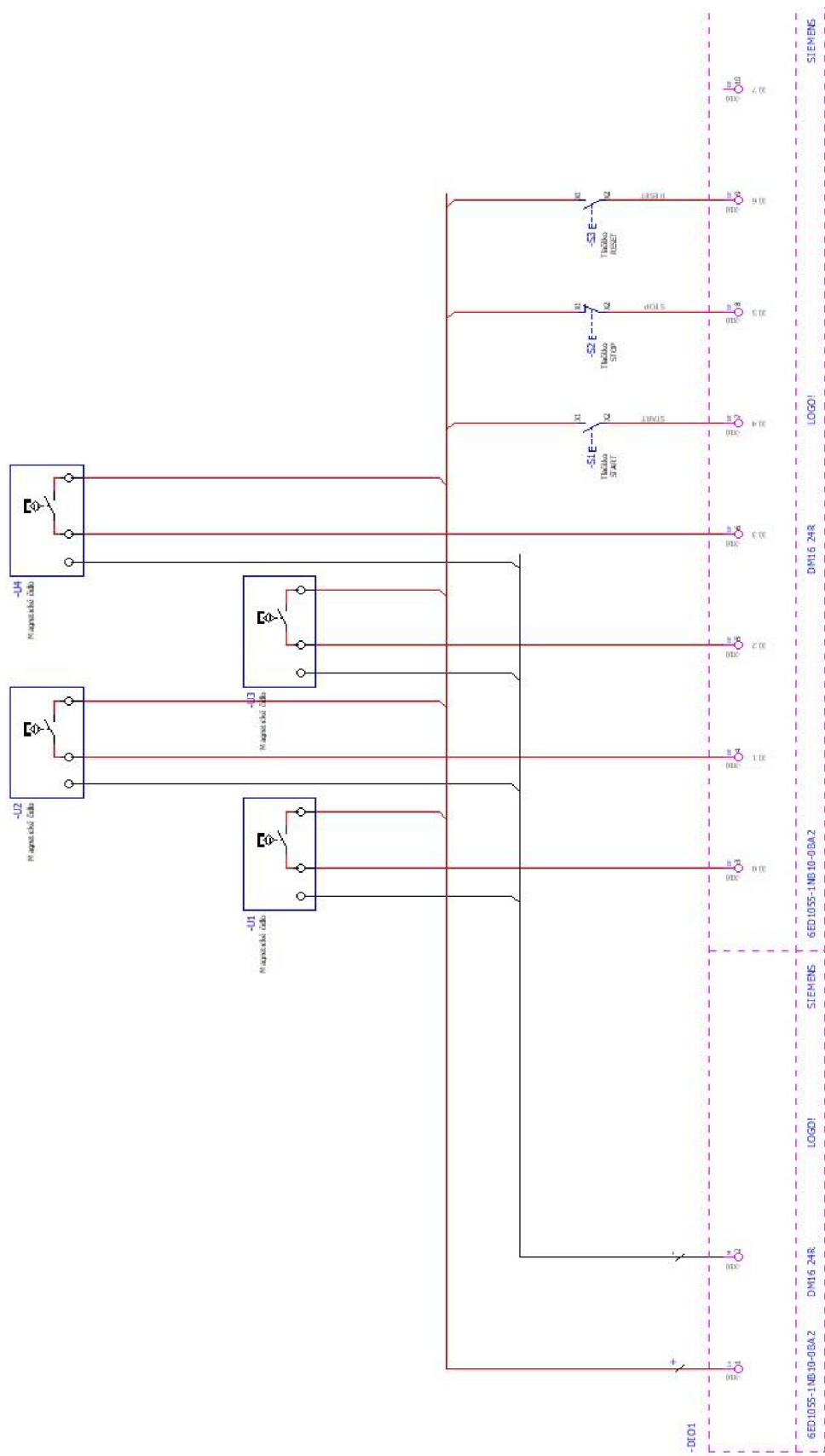
Příloha 2: Namotaný popruh uvnitř látkové kapsy tlumiče pádu



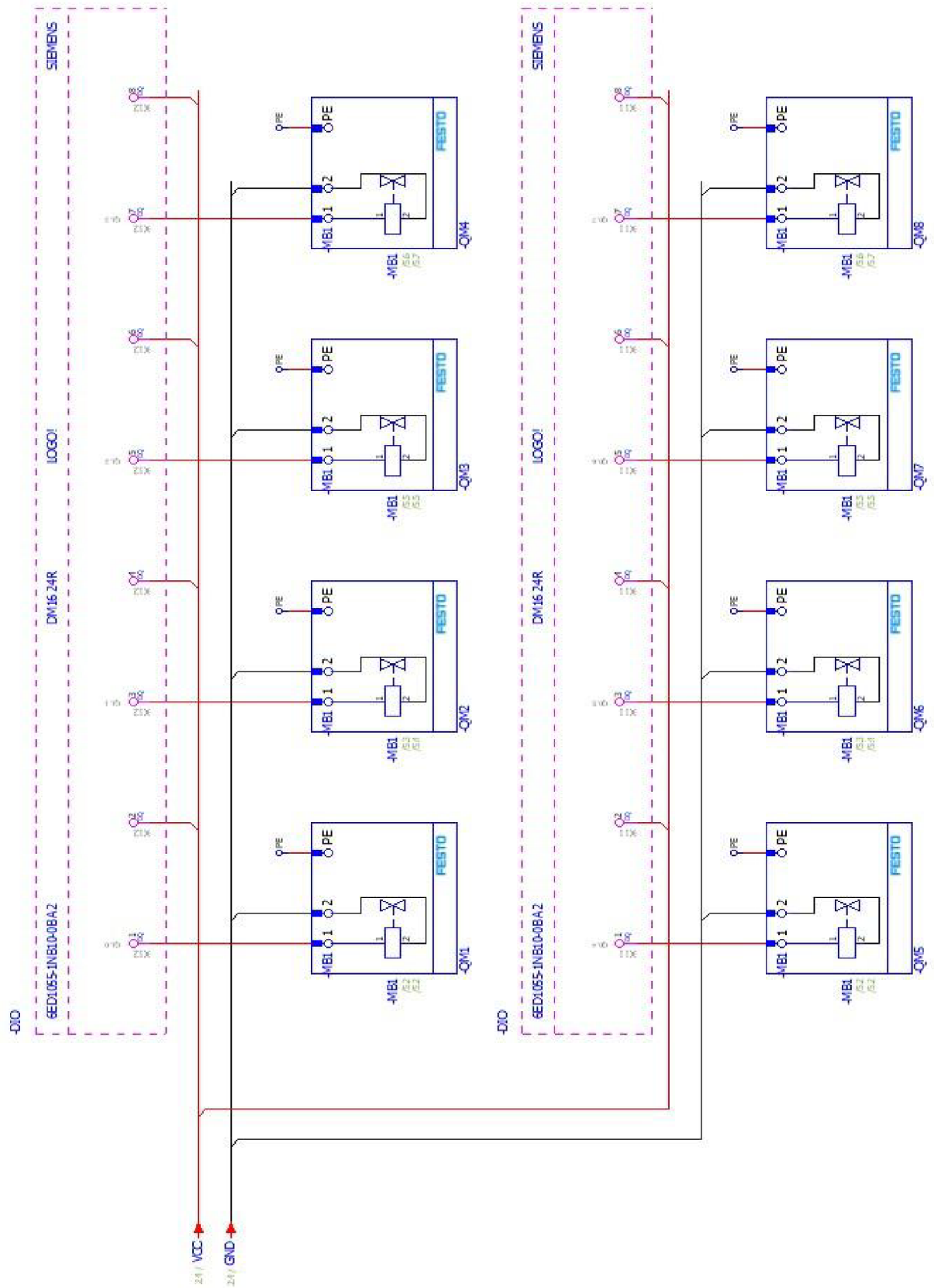
Príloha 3: Schéma pneumatického zapojení stroje



Příloha 4: Zapojení rozvaděče



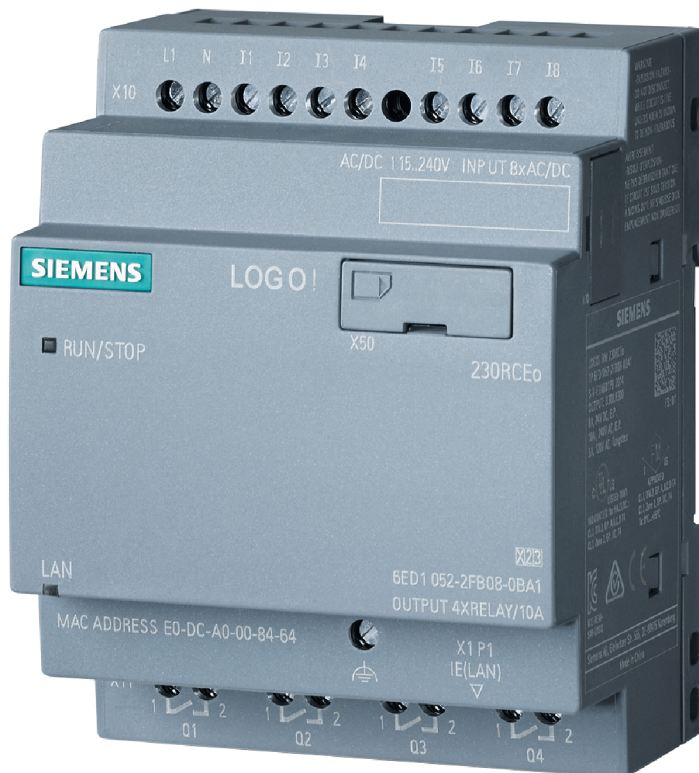
Příloha 5: Elektrické zapojení vstupů digitálního modulu PLC



Příloha 6: Elektrické zapojení ventilů a digitálního modulu PLC



Příloha 7: LOGO! PLC



Příloha 8: LOGO! DM16 24R



Příloha 9: LOGO! TDE



Příloha 10: Krokový motor EMMS-ST-87-S-SE-G2



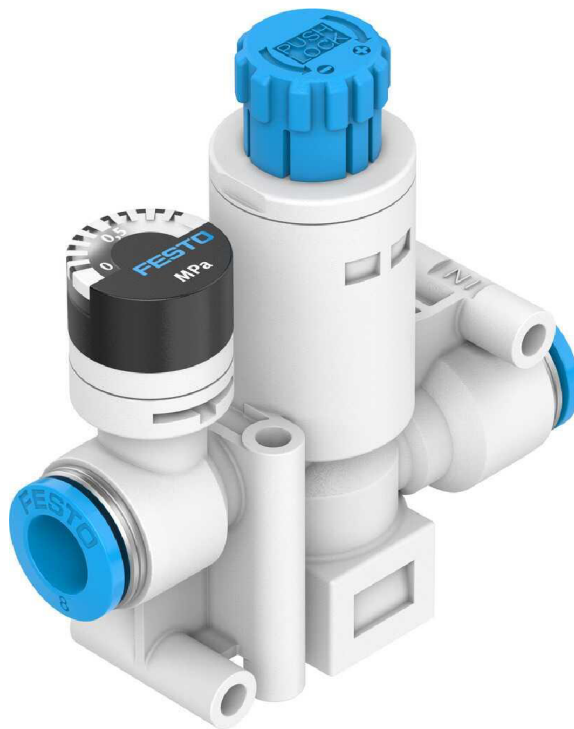
Příloha 11: Ovladač motoru CMMT-ST-C8-1C-PN-S0



Příloha 12: Zdroj napětí CACN-3A-1-10



Příloha 13: Elektromagnetický ventil VUVS-L20-P53C-MD-G18-F7-1C1



Příloha 14: Redukční ventil VRPA-CM-Q6-E



Příloha 15: páskovací zařízení ATS-MS 420S