TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

# Automatizace balení kalených skel na lince bočních autoskel

## Diplomová práce

| | |
|---|---|
| *Studijní program:* | N2301 Strojní inženýrství |
| *Studijní obor:* | Konstrukce strojů a zařízení |
| *Autor práce:* | **Bc. David Jaroš** |
| *Vedoucí práce:* | doc. Ing. František Novotný, CSc.<br>Katedra sklářských strojů a robotiky |
| *Konzultant práce:* | Ing. Tomáš Pekárek<br>AGC Automotive Czech, a.s. |

Liberec 2020

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

**Zadání diplomové práce**

# Automatizace balení kalených skel na lince bočních autoskel

*Jméno a příjmení:* **Bc. David Jaroš**
*Osobní číslo:* S18000258
*Studijní program:* N2301 Strojní inženýrství
*Studijní obor:* Konstrukce strojů a zařízení
*Zadávající katedra:* Katedra sklářských strojů a robotiky
*Akademický rok:* **2019/2020**

**Zásady pro vypracování:**

Linka bočních autoskel CD-71 produkuje denně cca 19.000 ks skel o celkové hmotnosti 60 tun. Boční skla na výstupu z linky jsou v současné době balena do expedičních palet ručně. V přepočtu na jednoho pracovníka se jedná o zabalení 7,5t skla za směnu, jedná se tedy o fyzicky velice náročnou práci, pro kterou je obtížné zajistit pracovníky obsluhy. Z toho důvodu bylo rozhodnuto o zahájení prací na automatizaci finální linky CD-71 a nahrazení lidí roboty. Automatizace musí zajistit řadu implementačních podmínek, které musí koncepční návrh způsobu řešení vyhovět. Dominantním požadavkem na začlenění robotů a potřebných podpůrných systémů do automatizace procesu balení je zajištění přesné pozice skel pro uchopení robotem s co nejmenším zásahem do stávající linky a s co nejnižšími náklady.
Úkolem Vaší DP bude:
1. Zpracovat podrobnou analýzu výrobního procesu na lince CD 71 se zaměřením na výstupní pracovní pozice linky; 2. Návrh koncepce způsobu automatizace balení kalených skel na lince formou několika variant řešení a výběr varianty pro podrobnější konstrukční zpracování; 3. Konstrukční řešení vybrané varianty formou dispoziční sestavy zařízení, sestavného výkresu a podsestav hlavních konstrukčních uzlů s důrazem na periferní zařízení pro zdvih a orientaci balíčků skel; 4. Technickoekonomické zhodnocení přínosu řešení.

| | |
|---|---|
| *Rozsah grafických prací:* | výkresová dokumentace |
| *Rozsah pracovní zprávy:* | 40-50 stran vč. výpočtů |
| *Forma zpracování práce:* | tištěná/elektronická |
| *Jazyk práce:* | Čeština |

**Seznam odborné literatury:**

1. KOLÍBAL, Z. a kol.: Roboty a robotizované výrobní technologie, VUT v Brně 2016, 787 s. ISBN 987-80-214-4828-5. 2. NOVOTNÝ, F. a M. HORÁK: Konstrukce robotů. TU v Liberci, 2015, 236 s. ISBN 978-80-7494-216-7. 3. NOVOTNÝ, F. a M. HORÁK: Efektory průmyslových robotů. TU v Liberci, 2015, 116 s. ISBN 978-80-7494-195-5. 4. Firemní podklady: 2D a 3D výkresy finální linky CD-71, specifikace expedičních palet, požadované takty linky a hmotnosti břemen, AGC Automotive Czech. 5. Technická dokumentace technologických hlavic a periferií robotů KSR TU v Liberci.

| | |
|---|---|
| *Vedoucí práce:* | doc. Ing. František Novotný, CSc.<br>Katedra sklářských strojů a robotiky |
| *Konzultant práce:* | Ing. Tomáš Pekárek<br>AGC Automotive Czech, a.s. |
| *Datum zadání práce:* | 1. listopadu 2019 |
| *Předpokládaný termín odevzdání:* | 1. května 2021 |

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2019

# Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

9. června 2020 Bc. David Jaroš

# Automatizace balení kalených skel na lince bočních autoskel

## Anotace

Práce analyzuje výrobní procesu na lince výroby bočních autoskel CD 71. Dále předkládá nutné podmínky pro chystanou automatizaci této výrobní linky a popisuje hlavní konstrukční uzly, na kterých musí být provedeny úpravy. Následně uvádí několik koncepčních návrhů variant layoutu vykládky a manipulačního chapadla, ze kterých je následně kriteriální volbou vybráno nejvhodnější řešení. Je předloženo konstrukční řešení chapadla a zdvihacího zařízení. Nakonec je provedeno technickoekonomické zhodnocení návrhu a vypočítána doba návratnosti.

## Klíčová slova

Automatizace linky, robotická paletizace, manipulační úloha, kriteriální rozhodovací analýza, uchopování skla, frikční koeficient, koncové chapadlo, zdvihací zařízení pro zdvih a orientaci

# Automatization of tempered glass packaging on an automotive side-windows producing line


## Annotation

This diploma thesis analyses producing process of car side-windows on producing line CD 71. Furthemore, it lists the imperative conditions for a planned automatization of the producing line, and describe the main construction nodes which has to be altered. Subsequently several designs of an unloading layout and a handling tentacle are stated and the most suitable one is chosen with a criterial choise. The construction design of the tentacle and lifting device is presented alongside with a technical-economical evaluation and an investment return is calculated.



## Keywords

Producing line automatization, robotic palletization, handling task, criterial evaluation analysis, gripping of glass, friction coefficient, end effector, lifting device for lift and orientation.

# Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce **doc. Ing. Františku Novotnému, CSc.** za skvělé odborné vedení, za množství cenných rad, velikou trpělivost, a hlavně za čas, který mně a mé práci věnoval.

Poděkování patří také **Ing. Tomáši Pekárkovi** za poskytnuté konzultace a také dalším pracovníkům **KSR** za poskytnuté odborné rady a postřehy, a to nejen při zpracovávání diplomové práce, ale během celého mého studia.

A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým blízkým, rodině, a hlavně rodičům za úžasnou celkovou podporu při mém studiu, které určitě nebylo nejsnazší ani pro ně. Moc si všeho, co jste pro mě udělali, cením.

# Obsah

Seznam použitých zkratek a značek ..... 10
Úvod ..... 11
1. Analýza současného výrobního procesu na lince CD 71. ..... 12
1.1 Současný stav linky ..... 12
1.2 Požadavky na automatizaci ..... 14
1.2.1 Zařízení pro orientaci a správné umístění skel ve stohu ..... 14
1.2.2 Zdvihací zařízení umístěné v dopravníku ..... 15
1.2.3 Paletizační robot a chapadlo ..... 15
1.2.4 Paletizační zařízení ..... 15
1.2.5 Bezpečnost pracoviště ..... 16
1.3 Technické požadavky ..... 16
1.3.1. Rozměry skel ..... 16
1.3.2. Rozměry palet ..... 17
1.3.3 Strojní čas ..... 19
2. Návrh koncepce ..... 20
2.1 Koncepční řešení layoutu balení skel linky CD 71 ..... 20
2.1.1 Varianta A – dvoupozicový stůl ..... 20
2.1.2 Varianta B – třípozicový stůl ..... 21
2.1.3 Varianta C – čtyřpozicový stůl ..... 23
2.1.4 Varianta D – šestipozicový stůl ..... 24
2.1.5 Rozhodovací analýza pro výběr nejlepší varianty ..... 25
2.2 Koncepční řešení chapadla pro realizaci automatického balení ..... 25
2.2.1 Varianta A – chapadlo inspirované existujícím chapadlem v AGC ..... 25
2.2.2 Varianta B – chapadlo s posuvným úchopným prvkem ..... 27
2.2.3 Varianta C – chapadlo s rotačním úchopným prvkem ..... 27
2.2.4 Varianta D – chapadlo založen na využití paralelogramu ..... 28
2.1.5 Rozhodovací analýza pro výběr nejlepší varianty ..... 28
2.3 Koncepční řešení zvedáku stohů skla ..... 29
2.4 Volba robotu ..... 30
3. Konstrukční řešení ..... 32
3.1 Konstrukční řešení chapadla ..... 32
3.1.1 Manipulační úloha ..... 33
3.1.2 Volba prvků ..... 39
3.1.3 Pevnostní výpočet namáhaných částí ..... 41

3.1.4 Konstrukční provedení ..... 43
3.2 Konstrukční řešení zdvihacího zařízení ..... 45
3.2.1 Volba prvků ..... 45
3.2.2 Konstrukční provedení ..... 47
3.2.3 Umístění zvedáku do dopravníku ..... 48
4. Technickoekonomické zhodnocení ..... 51
4.1 Technické zhodnocení ..... 51
4.2 Ekonomické zhodnocení ..... 51
4.2.1 Odhad pořizovacích nákladů ..... 51
4.2.2 Doba návratnosti ..... 51
Závěr ..... 53
Seznam použité literatury ..... 54
Seznam příloh ..... 55

# Seznam použitých zkratek a značek

| **Zkratka** | **Význam** |
|---|---|
| $\mu$ | Koeficient tření |
| $M_{max}$ | Maximální ohybový moment [N] |
| $F_U$ | Úchopná síla [N] |
| G | Gravitační síla [N] |
| O | Odstředivá síla [N] |
| T | Setrvačná síla [N] |
| $M_k$ | Krouticí moment [Nm] |
| $R_e$ | Mez kluzu [MPa] |
| $\sigma_0$ | Napětí [MPa] |
| $W_0$ | Průřezový ohybový modul [$mm^3$] |
| VZV | Vysoko zdvižný vozík |
| g | Tíhové zrychlení [$m/s^2$] |
| k | Koeficient bezpečnosti |
| KSR | Katedra sklářských strojů a robotiky |
| m | Hmotnost [kg] |
| ÚP | Úchopný prvek |
| $\varepsilon$ | Úhlové zrychlení [rad] |
| $\omega$ | Úhlová rychlost [$rad.s^{-2}$] |
| PR | Průmyslový robot |
| JN | Jednorázové náklady |
| UN | Uspořené náklady |
| 3D | Trojrozměrný |

# Úvod

Předkládaná práce se skládá ze čtyř hlavních částí. První část se zabývá analýzou výrobního procesu, druhá část prezentuje koncepční návrhy, třetí část obsahuje konstrukční řešení a poslední část se zabývá zhodnocením celé diplomové práce.

První část nejprve hodnotí současný výrobní proces na výrobní lince bočních autoskel CD 71 firmy AGC Automotive Czech, analyzuje jej z hlediska plánované automatizace a následně přináší výčet konstrukčních uzlů, které musí být přebudovány pro zajištění možnosti automatizaci linky.

Druhá část předkládá několik rozdílných koncepčních variant návrhu layoutu vykládky a manipulačního chapadla, ze kterých je následně pomocí kriteriální rozhodovací analýzy vybráno nejlepší řešení, které je podrobně zpracováno v následující části.

Cílem třetí části je návrh a realizace vhodného konstrukčního řešení pro chapadlo a zdvihací řešení, který vychází z předchozí analýzy. Tato část také obsahuje popis a prezentaci jednotlivých pozic, kterými prochází stoh skla při paletizační úloze.

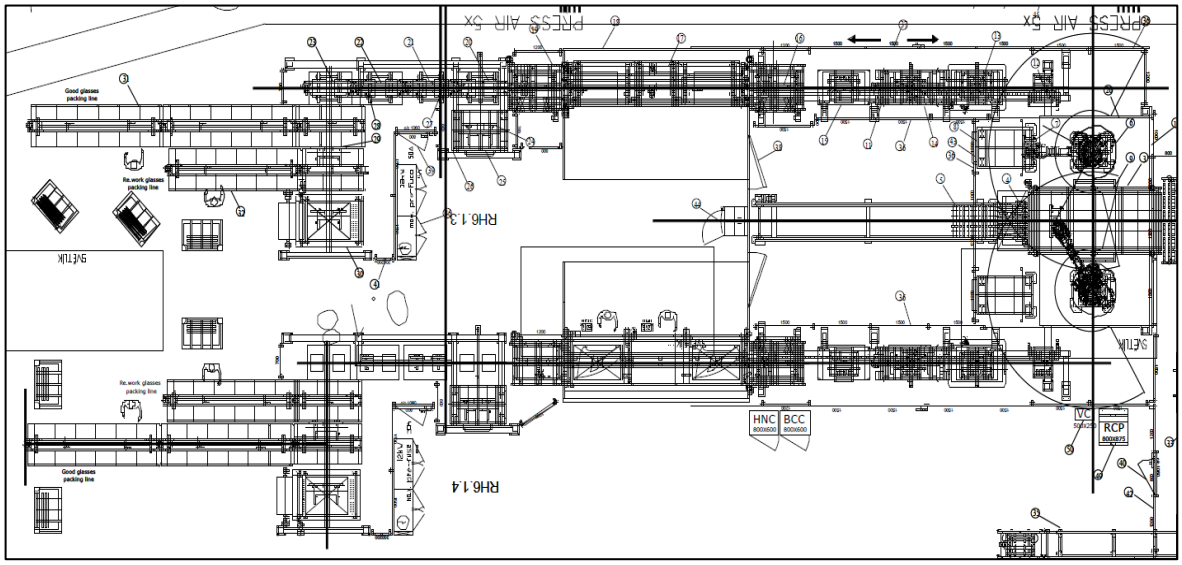
Poslední část práce shrnuje technický přínos diplomové práce a předkládá předpokládanou dobu návratnosti celého projektu automatizace výrobní linky.

# 1. Analýza současného výrobního procesu na lince CD 71.

## 1.1 Současný stav linky

Linka CD 71 je výrobní linka, na které dochází k tvarování bočních skel do automobilů. Linka produkuje denně přibližně 19 000 skel o celkové hmotnosti až 60 tun. V současné době jsou skla na výstupní části linky balena ručně do expedičních palet a na jednoho pracovníka za směnu tak připadá manipulace s až 7 500 kg skla.

Skla vyráběná na této lince jsou určena do různých modelů automobilů, a tak jsou rozměrově velmi různorodá. Nejmenší vyráběné sklo má šířku 250 a výšku 320 mm (šířkou je myšlen rozměr v ose linky, výškou rozměr kolmo na osu) a největší vyráběné sklo má šířku 1200 a výšku 800 mm. U jednotlivých výrobků se liší také tloušťka, která se pohybuje v rozmezí od 1,6 mm do 4,85 mm.




*Obr. 1 Layout vykládky linky CD 71*

Linka CD 71 se skládá ze třech částí – nakládka, samotná pec a vykládka. Tato diplomová práce poskytuje informace o celém výrobním procesu na lince, ale následně se detailně zabývá pouze poslední částí linky, a to vykládkou.

První část, nakládka, slouží k nakládání předpřipraveného výrobku, který má předem definovaný tvar, obroušené hrany, vyvrtané otvory a aplikovaný potisk. Takto připravená skla jsou dovážena z mezioperačního skladu na speciálních paletách, na kterých jsou jednotlivá skla oddělena pomocí vložených provázků.

Nakládací část se skládá ze dvou stejných paralelních linek nakládání. Každá linka nakládání je obsluhována operátorem, který sejme sklo z palety a ručně ho umístí do poziční šablony na nakládacím stole. Sklo je následně automaticky přesunuto pod optickou kontrolu celistvosti natištěného potisku a razítka, tato kontrola je vyhodnocena a výskyt nevyhovujícího razítka je hlášen operátorovi. Nevyhovující skla musí být ručně vyjmuta. Je-li vše v pořádku, sklo pokračuje do akumulačního stolu, který umožnuje v případě náhlé poruchy pece mechanické zdvižení skla a stohování skel nad sebe.

Sklo dále pokračuje na centrovací stůl, na kterém jsou vyrovnány odchylky od požadované pozice. Následně je sklo uchopeno robotem a přesunuto na vstupní stůl před pecí, sklo poté postupuje dopravníkem směrem k peci.

Sklo je v nahřívací peci nahřáto na takovou teplotu, která umožnuje následné tvarování. Po výstupu z pece sklo pokračuje do tvarovací části, ve které se rovinné ploché sklo vytvaruje do skla s požadovaným zakřivením prostorového tvaru.

Mezi pecí a tvarovací částí je umístěn tzv. *land scanner*, což je opticky senzor, který detekuje infračervené záření a slouží ke kontrole rozprostření teplotního pole ve skle.

Dále sklo postupuje do kalicí části, kde dochází k prudkému zchlazení prostředí, čímž se povrch skla prudce ochladí, ale jeho vnitřek zůstane horký, čímž vznikne vnitřní napětí. Tento proces se nazývá kalení a dosáhne se jím požadovaných mechanických vlastností. Sklo dále postupuje po dopravníku, na kterém je postupně chlazeno na teplotu blízkou okolní teplotě

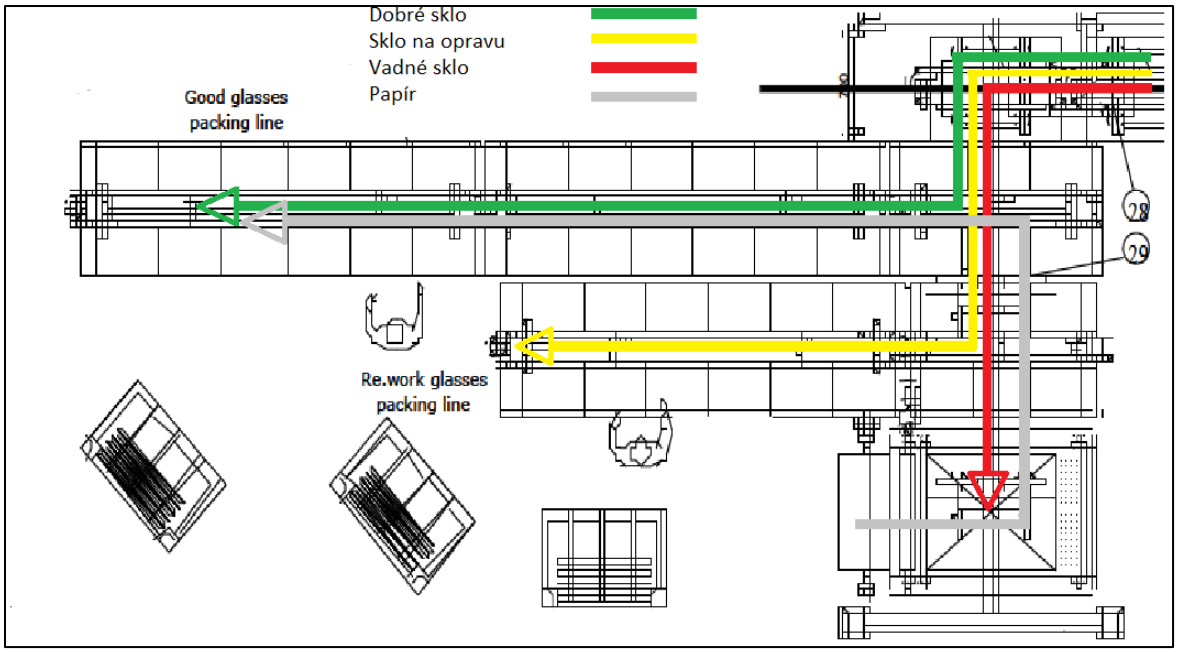
Finální část, vykládka, je poslední část linky mezi pecí a balením hotového skla do transportních palet. Z pece přes chladící dopravník vystupují vytvarovaná skla rychlostí jedno sklo za 3 sekundy (tedy takt 3 s). Nejprve sklo postupuje na stůl, na kterém je opticky zkontrolována pozice a případné vady tvaru skla. Tato informace je předána příslušnému robotu angulárního typu. Je-li sklo detekováno jako poškozené, je pomocí aktivních úchopných prvků přesunuto do odpadního kontejneru. Je-li naopak detekováno, že je sklo v pořádku, robot jej přesune na jednu ze dvou následných paralelních, totožných, ale zrcadlově obrácených linek (pravá a levá linka). Vzhledem k celkovému taktu 3 s je tedy na každou část linky je přesunuto sklo každých 6 sekund. V případě, že se robot nachází mimo provoz, skla se ze slotu optické kontroly mohou přesunout do dopravníkového zásobníku, ve kterém jsou umístěna až do opětovného zprovoznění robota. Zpětný chod dopravníku umožní dopravu do pozice pro uchopení robotem.

V případě, že sklo je detekováno jako bezvadné a je přesunuto na jednu ze dvou linek, postupuje do pozice pro centrování skla, kde je upřesněna pozice. Poté je sklo přesunuto na kontrolní maketu ke kontrole tvarových rozměrů pomocí *microsamplu*. Následně sklo pokračuje na sklápěcí stůl, na kterém se sklopí do vodorovné pozice, která je vhodnější pro vizuální kontrolu vad v kontrolní kabině, kam sklo pokračuje.

V kontrolní kabině je sklo podrobeno optické kontrole prováděné specializovanou obsluhou, která rozhoduje o následném osudu skla. Obsluha má tři možnosti rozhodnutí – vyřazení skla, sklo určené na opravu a sklo vhodné k zabalení.

Sklo je následně po výjezdu z kontrolní kabiny na sklápěcím stole opět sklopeno do vodorovné pozice a následně pomocí jednoúčelového manipulátoru přesunuto na odpovídající místo. V případě, že obsluha označí sklo jako vadné a nevhodné k další opravě, je sklo přesunuto do střepového odpadního kontejneru. Obsahuje-li sklo drobnou vadu vhodnou k opravě, nebo je určeno k finálnímu zabalení, je přesunuto manipulátorem na příslušný dopravník.

Skla určená na zabalení jsou v současnosti rovnána do stohů po čtyřech až deseti kusech. Mezi každé sklo je balicím zařízením pokládán arch balicího papíru, aby nedošlo k jeho poškrábání. Stohy skla jsou následně ručně baleny a paletizovány do příslušných kontejnerů. Do jednotlivých kontejnerů se vejde 130 až 200 ks skla podle tloušťky jednotlivých skel.




*Obr. 2 Materiálový tok na lince*

## 1.2 Požadavky na automatizaci

Při automatizaci linky je potřeba upravit téměř všechny periferie a dodržet podmínky pro bezpečnost obsluhy.

### 1.2.1 Zařízení pro orientaci a správné umístění skel ve stohu

Sklo má po vizuální kontrole a po manipulaci na sklopných dopravnících nestabilní pozici z důvodu prokluzu a stáčení na přechodech dopravníku. Z tohoto důvodu musí být zajištěna korekce pozice skla. Korekce musí být provedena ve dvou osách (osa X a Y) a jedné rotaci. Aktuální pozice skla na dopravníku bude zjišťována pomocí kamery, která bude umístěna na volné pozici krokujícího dopravníku.

Rotace skla je v současné době řešena jednoduchým pneumatickým obracečem o 180°, tento obraceč bude nahrazen servopohonem a korekce bude také prováděna během přesunu skla na odpovídající dopravník

Při skládání skel do stohů je mezi jednotlivá skla vkládán arch papíru. V současné době je nejdříve položen arch papíru a na něj jsou následně skládaná jednotlivá skla, mezi které je dále také vždy vložen arch papíru, aby se zabránilo poškrábání. Na poslední sklo je následně také položen arch papíru, který kryje sklo seshora. Založení archu papíru je prováděno automaticky pomocí manipulátoru s efektorem, který je složený z rámu osazeného přísavkami.

V současné době není nijak řešeno spojení přečnívajících části papíru z důvodu, že stohy skla jsou paletizovány ručně a operátor je schopný přečnívající část papíru „ohnout a přizpůsobit“ a správně vložit stoh skla do palety.

Robot není schopný přizpůsobit uchopení změně pozice papíru, a navíc vrchní a spodní arch není nijak spojen s ostatními, které jsou zatížené vahou skla, a tak hrozí jejich sklouznutí do špatné polohy či úplné spadnutí. Z tohoto důvodu je potřeba spojit archy tak, aby držely ve stálé pozici.

Všechna zařízení obsažena v tomto odstavci jsou pro správnou automatizaci nezbytná, avšak řešením těchto periferií se tato práce nezabývá.

### 1.2.2 Zdvihací zařízení umístěné v dopravníku

Do linky je potřeba instalovat zařízení, které zvedne stoh skla nad úroveň dopravníku, aby robot s uchopovacím zařízením byl schopný stabilně uchopit stoh skla. Takže uchopovací systém musí stoh skla uchopit seshora i zespoda současně a to v případě, kdy stoh leží na dopravníku, není možné.

Zvedák bude instalován do výrobní linky v místě, kde bude paletizační robot uchopovat stoh. Protože stoh skla z důvodu prokluzu dopravníku nemusí být vždy ve stejné poloze, je potřeba na volnou část dopravníku umístit kameru, která bude snímat současnou polohu stohu skel. Pro snazší uchopování bylo rozhodnuto zvedák doplnit o přídavný pohon, který bude schopný natáčet stoh do pozice, která bude nejvhodnější pro robotické uchopení, a současně bude korigovat nepřesnosti vzniklé dopravníkem

### 1.2.3 Paletizační robot a chapadlo

Paletizační robot musí mít dostatečnou nosnost, aby byl schopný manipulovat se stohem skla, a současně mít dostatečnou rychlost, aby byl schopný paletizační úlohu provést v požadovaném čase.

Nejvhodnější robot pro manipulační a paletizační úlohy je robot angulárního typu. Robot bude vybrán z nabídky firmy ABB, která je hlavním dodavatelem robotů do firmy AGC Automotive Czech.

Pro samotné uchopování stohů skel bude navržen speciální úchopné chapadlo, které bude schopné uchopovat všechny druhy stohů skel. Stohy skel je možné uchopovat pouze z jedné strany z důvodu malého volného prostoru kolem skel v paletách. Chapadlo tedy musí být jednoduché konstrukce, aby bylo schopné uchopovat veškerou škálu vyráběných skel. Chapadlo je potřeba vhodně dimenzovat, aby bylo schopné vyvinout dostatečnou uchopovací sílu pro pevné a stabilní uchopení všech druhů stohů skla.

Stoh skla bude do palety položen tak, aby spodní hrana stohu byla položena na spodní pryžové obložení do takové pozice, aby nemuselo dojít k posunování po tomto obložení. Následně bude stoh uvolněn ze sevření a chapadlem přitlačen na přesné místo v paletě. Je potřeba zohlednit materiál a obložení plochy, popřípadě hrany, která bude přitlačovat stoh na určené místo, aby nedocházelo k poničení povrchu a hran skla. Tento požadavek je potřeba zohlednit v ovládacím programu robota, aby každý stoh skel byl dán na přesně určené místo v paletě, které bude posunuto oproti předchozímu stohu o tloušťku tohoto jednoho stohu.

### 1.2.4 Paletizační zařízení

Při automatizaci paletizace je potřeba zajistit, aby naplněná paleta byla nahrazena prázdnou paletou. Je potřeba, aby tato výměna byla provedena během jednoho cyklu bez prodlevy, která by celou linku pozastavila a tím by se snižovala účinnost celé linky.

V současné době každá paleta po naplnění stohy skla musí být ručně operátorem zabalena a následně pomocí vysokozdvižného vozíku odvezena do skladu. Z tohoto důvodu, aby bylo předcházeno prodlevám, jsou na lince umístěny dvě palety vedle sebe s tím, že současně je první plněna a druhá, naplněná, je zabalena, odvezena do skladu a vyměněna za prázdnou.

Musí být navržen zásobník, univerzální pro všechny používané palety. V tomto zásobníku budou palety posouvány a postupně robotem zaplněny stohy skla, ručně zabaleny a zapáskovány a následně odvezeny do skladu. Je tedy potřeba navrhnout takový zásobník, který bude mít minimálně tři polohy – jednu pro plnění sklem, druhou pro ruční zabalení a poslední pro odvezení palety a umístění prázdné.

Hlavní požadavkem na podobu zásobníku je dostatek času na zabalení, odvezení plné palety a její následné nahrazení prázdnou.

### 1.2.5 Bezpečnost pracoviště

Při automatizaci a umístění robota do výrobní linky musí být zajištěna bezpečnost obsluhy provozu. Je potřeba určit pracovní prostor a následně zvolit vhodné ohraničení bezpečného prostoru, aby nemohlo dojít ke kontaktu člověka s robotem. Pro bezpečnost se využívají i další bezpečnostní opatření, jako jsou optické závory a další bezpečnostní prvky.

## 1.3 Technické požadavky

Technické požadavky na jednotlivá zařízení jsou determinovány velikostí, rozměry a hmotností skel a zvoleným počtem skel ve stohu.

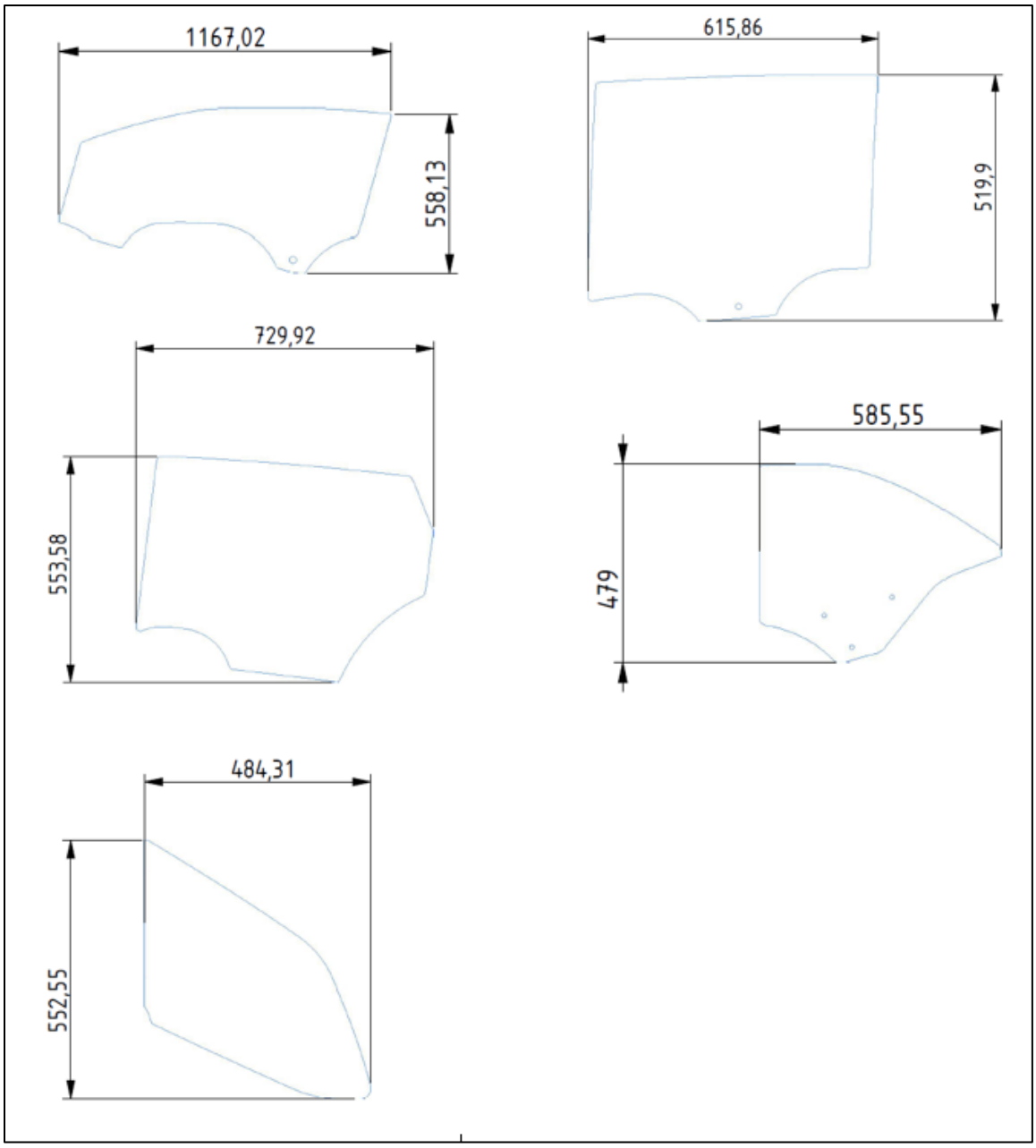
### 1.3.1. Rozměry skel

Na lince je vyráběno přibližně padesát různých typů skel v pravém a levém provedení. Rozměry skel se pohybují od šířky 250 mm a výšky 320 mm (šířkou je myšlen rozměr v ose linky, výškou rozměr kolmo na osu), až po největší rozměr vyráběného skla šířky 1200 a výšky 800 mm.

Tloušťka jednotlivých skel se pohybuje v rozsahu od 1,6 mm až po 4,85 mm. Jednotlivá skla ve stohu jsou proložena papírem, aby nedocházelo k jejich poškození. Arch papíru má tloušťku 0,1 mm a je umístěn také na vrchu stohu, aby ani v paletě nedošlo ke kontaktu skla se sklem mezi jednotlivými stohy. Vzhledem k možnostem palet jsou skla balena do stohů po 4 až 10 kusech, přičemž tenká skla jsou z ekonomických důvodů zpravidla balena do stohů o maximálním počtu skel.

Chapadlo musí tedy být navrhnuto tak, aby bylo schopné uchopit stoh 10 kusů skel o maximální tloušťce jednoho skla 4,85mm, proložených archy papíru o tloušťce 0,1 mm. Maximální tloušťka jednoho stohu skla je tedy 49,5 mm (4,85x10 + 0,1x10 = 49,5 mm). K této hodnotě musí být dále připočítána taková rezerva zdvihu, která umožní vyrovnat nepřesnost najetí a vyjetí chapadla, eliminující nepřesnost naučení a opakovatelnosti cyklu. Jelikož jsou skla o nejmenších tloušťkách vždy balena do stohů s co největším počtem kusů, byla jako nejmenší možná tloušťka stohu uvažováno 10 kusů skel o tloušťce 1,6 mm, tedy o tloušťce stohu 17 mm (1,6 x10 + 0,1x10). Chapadlo bude navrhováno tak, aby jeho rozsah rozevření byl 15 až 90 mm (rozmezí minimálního a maximálního stohu +/- tolerance).

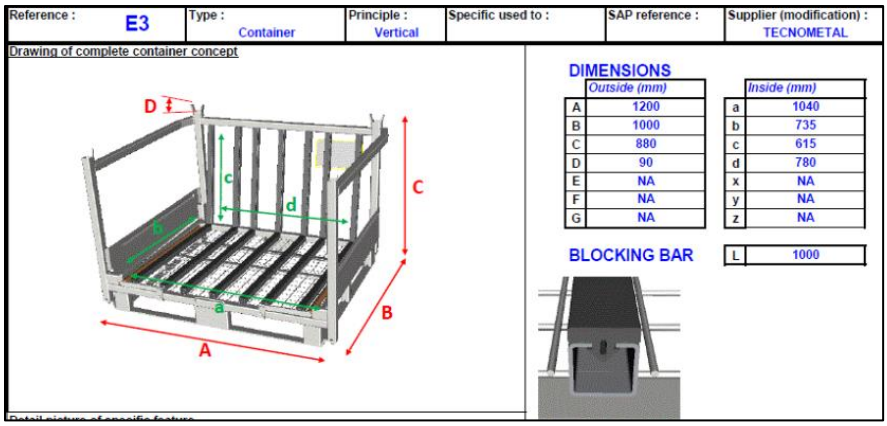
Rozměry skel ovlivňují hmotnost stohů. V současnosti nejtěžší vyráběné sklo váží 5,56 kg, a protože je baleno do stohů po 10, musí být hmotnost, na kterou bude chapadlo dimenzováno, minimálně 55,6 kg.



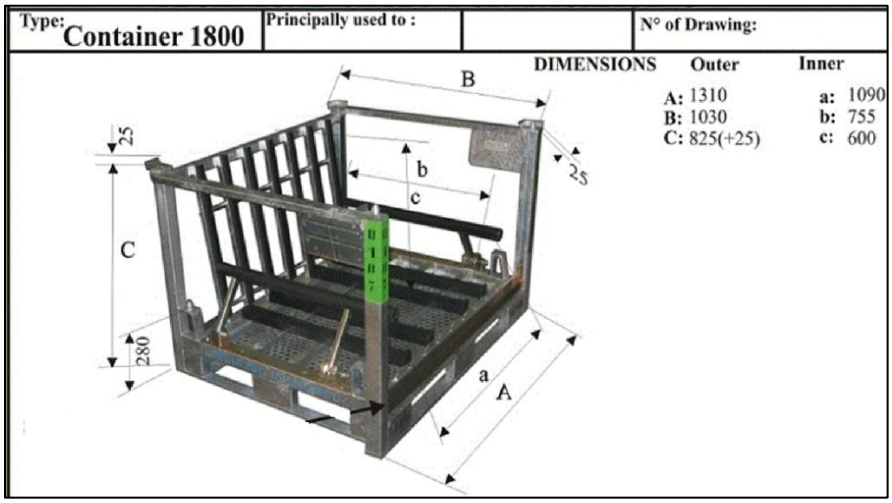

*Obr. 3 Rozměry typových představitelů vyráběných skel*

### 1.3.2. Rozměry palet

Stohy skla jsou paletizovány do různých typů transportních palet. Níže (Obr. 4 až Obr. 6) jsou vyobrazeny modely některých používaných transportních palet s uvedením jejich rozměrů.




*Obr. 4 Transportní paleta E3*




*Obr. 5 Transportní paleta Container 1800*

*Obr. 6 Transportní paleta pro Audi FD - Jedná se o balení do dvou pil, sklo otočené o 90°*

Rozměry a tvary palet omezují prostor pro manipulaci, a tím kladou velké nároky na úchopnou hlavici, která musí být navržena tak, aby nedocházelo ke kolizním situacím.

Na dně palet jsou umístěny pryžové pásy, které zajišťují bezpečný kontakt skla s paletou. Dno je zkosené směrem k zadní straně z důvodu, aby stohy skel byly paletizovány se sklonem a při umístění stohu a jeho uvolnění došlo přiklopení horní části stohu skla k zadní straně.

### 1.3.3 Strojní čas

Důležitý faktor ovlivňující konstrukci jednotlivých uzlů a správnou volbu periferních zařízení je doba pracovního cyklu a čas jednotlivých operací. Čas jednotlivých operací je přímo ovlivněn taktem pece, který je 3 s, což znamená, že každé 3 sekundy vyjede z pece jedno vytvarované sklo. Skla z pece odebírají dva roboty se samostatnými pracovními cykly, přičemž každý robot sklo pokládá na jiný dopravník, čímž se zvyšuje čas na jednotlivé dílčí procesy na dvojnásobný, tj. 6 sekund na jedno sklo.

Skla jsou balena do stohů od 4 až po 10 kusů v závislosti na jejich tloušťce a požadavcích odběratele. Skla, která jsou narovnána do stohů, pokračují po dopravníku směrem k paletizaci. Na této části dopravníku bude umístěna kamera, která bude snímat aktuální polohu stohu skla, který bude dále pokračovat na zvedák. Zvedák nadzvedne stoh do polohy, kde ho robot bude schopný uchopit a současně ho natočí do polohy, která bude nejvhodnější pro uchopení.

Z těchto požadavků vyplývá, že paletizační robot musí být schopen vykonat požadovaný úkon od uchopení stohu skla, vložení do palety a následné vrácení do výchozí polohy pro uchopování takovou rychlostí, aby stíhal odebírat jeden stoh skla za 24 s (4x 6s) až po nejmenší požadavek na rychlost, kde rychlost odebírání stohů skla je 60 s (10x 6s)

Čas plnění jedné palety je přibližně 10 minut, tento čas je ovlivněn množstvím a tloušťkou skel v jednotlivé paletě.

# 2. Návrh koncepce

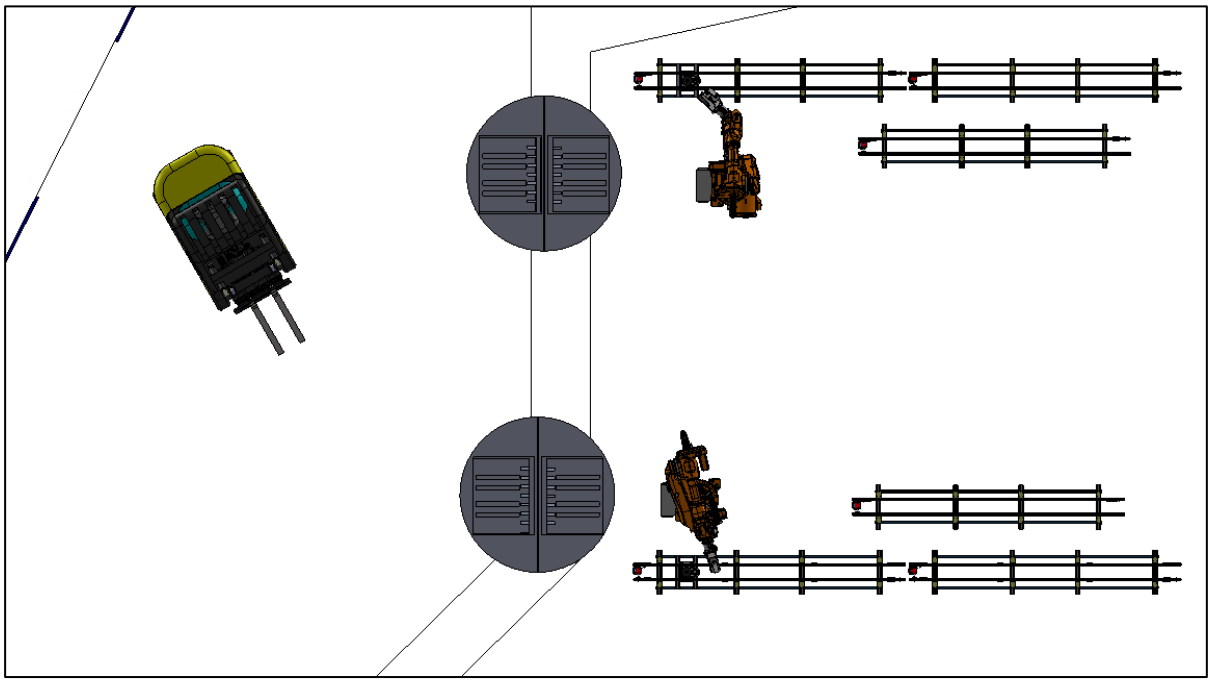
Návrh koncepce způsobu automatizace balení skel je proveden v několika variantách a následně je pomocí kriteriální rozhodovací analýzy vybráno nejvhodnější řešení.

## 2.1 Koncepční řešení layoutu balení skel linky CD 71

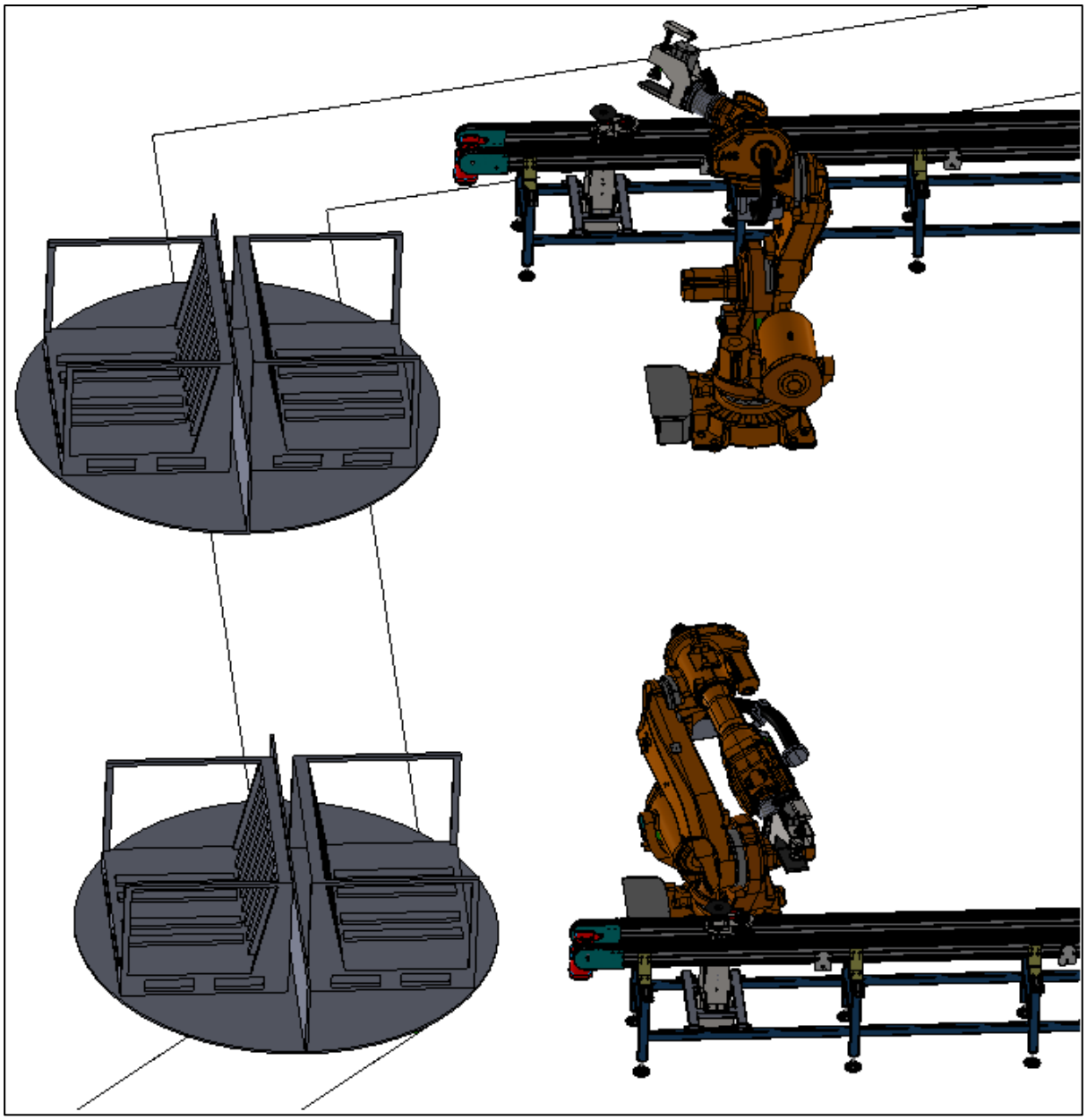
K zástavbě do stávajícího layoutu linky byly na základě provedené analýzy a stanovených požadavků zpracovány 4 varianty řešení, které jsou prezentovány na následujících osmi obrázcích (obr. 7 až obr. 14)

### 2.1.1 Varianta A – dvoupozicový stůl

Varianta je založena na využití otočného stolu s dvěma pozicemi pro paletu. Jedná se o nejlevnější variantu, při které je současný layout linky bez změny a je zachován i chodník pro pěší (zeleně vyznačen). Chodník přináší komplikace při odvážení palety vysokozdvižným vozíkem (VZV), protože musí právě přes chodník přejíždět. Další nevýhoda spočívá v tom, že palety na obou stranách linky jsou naplněny přibližně ve stejné době, takže pro obsluhu je omezen čas (cca 10 minut) na zajištění obou palet a jejich následný odvoz a výměnu za prázdné.



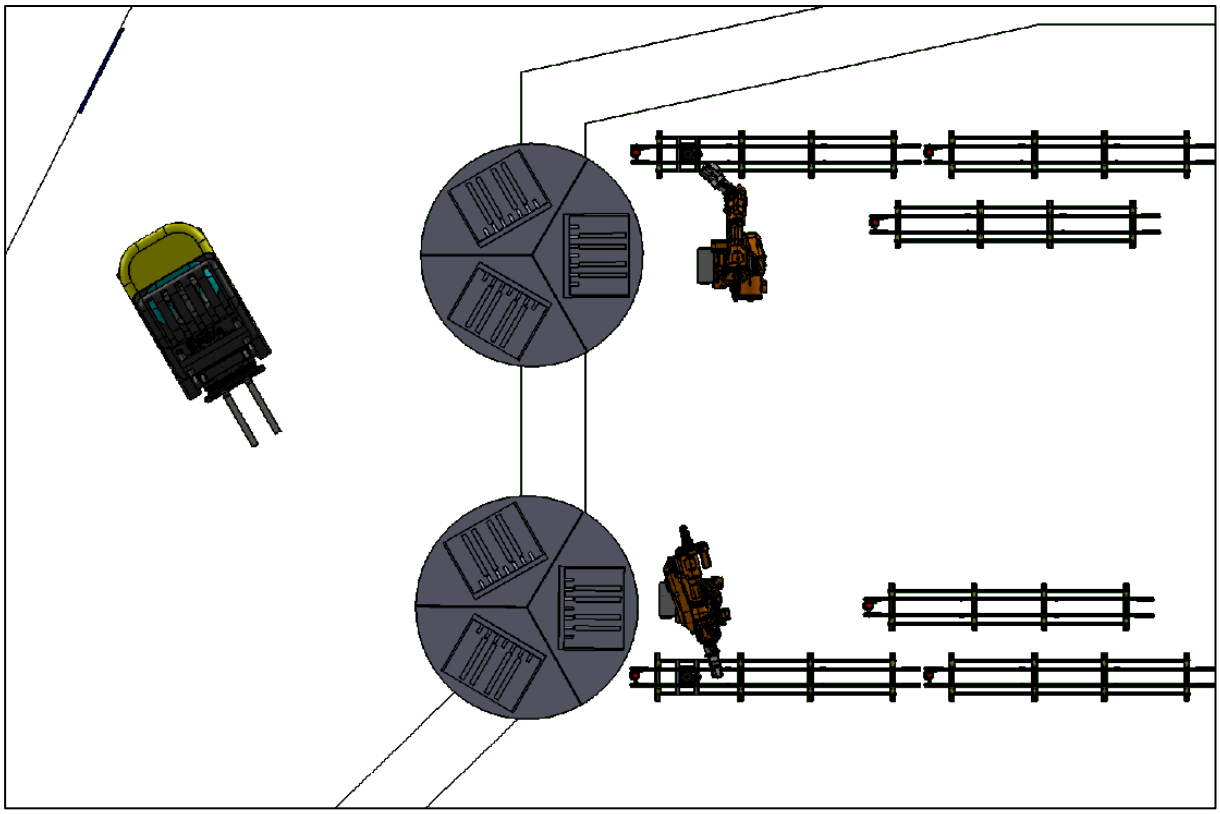
*Obr. 7 Princip automatické manipulace na konci linky CD 71 – Varianta A*



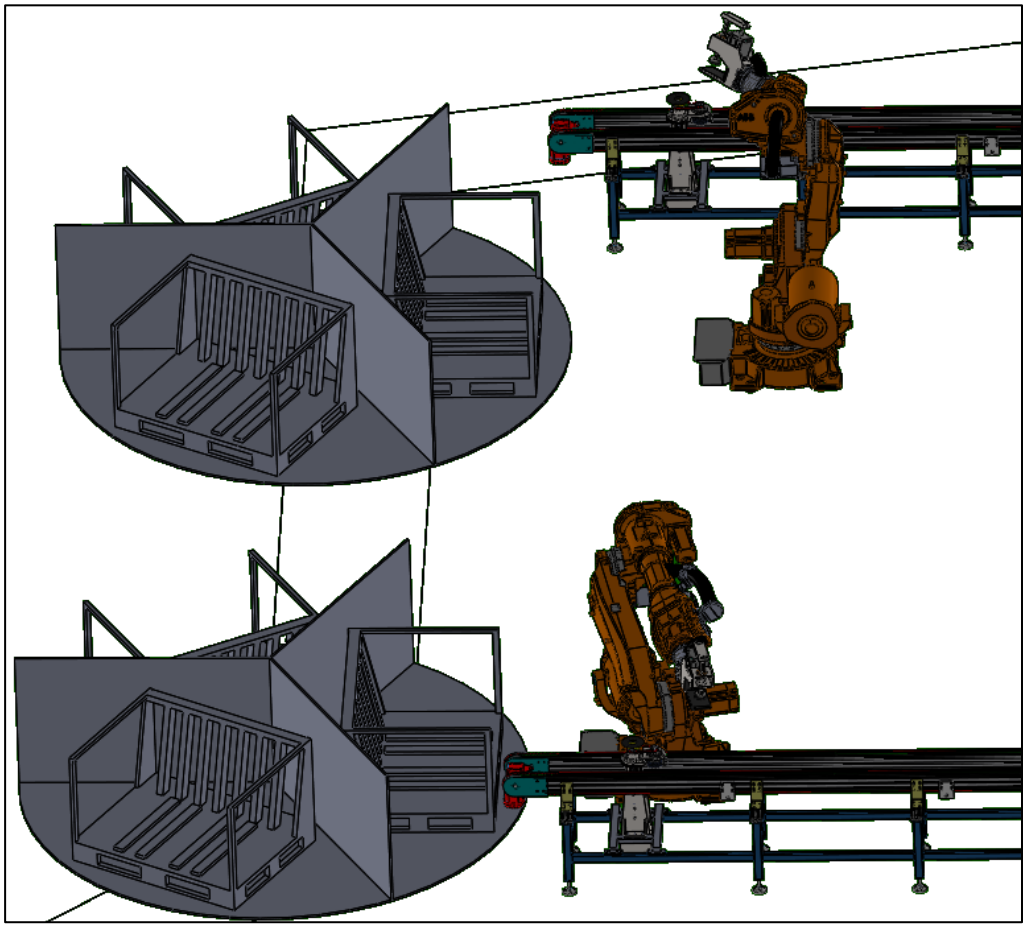
*Obr. 8 3D model schématu – Varianta A*

### 2.1.2 Varianta B – třípozicový stůl

Tato varianta je založena na použití otočného stolu se třemi pozicemi pro palety, kde jedna je pomocí robota plněna a následující dvě jsou ručně baleny a pomocí VZV odváženy a měněny za prázdnou. Toto řešení poskytuje více času na výměnu palety, ale koncepční řešení stolu umožnuje manipulaci s paletami pouze z boků pod úhlem, a to omezuje manipulační prostor pro VZV.



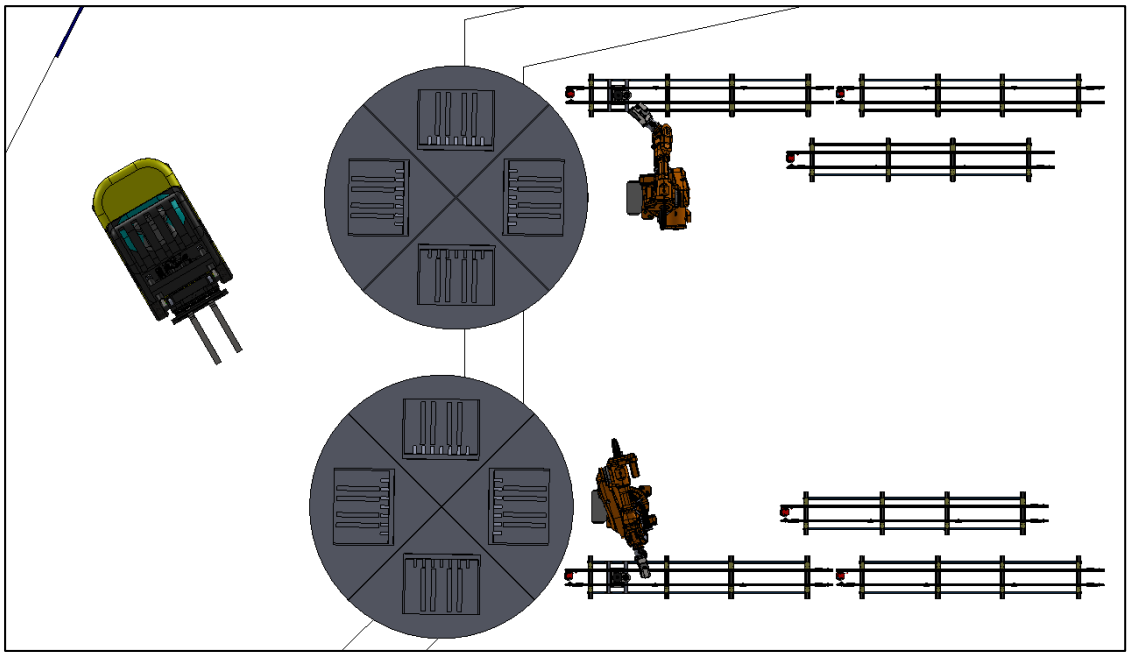
*Obr. 9 Princip automatické manipulace na konci linky CD 71 – Varianta B*



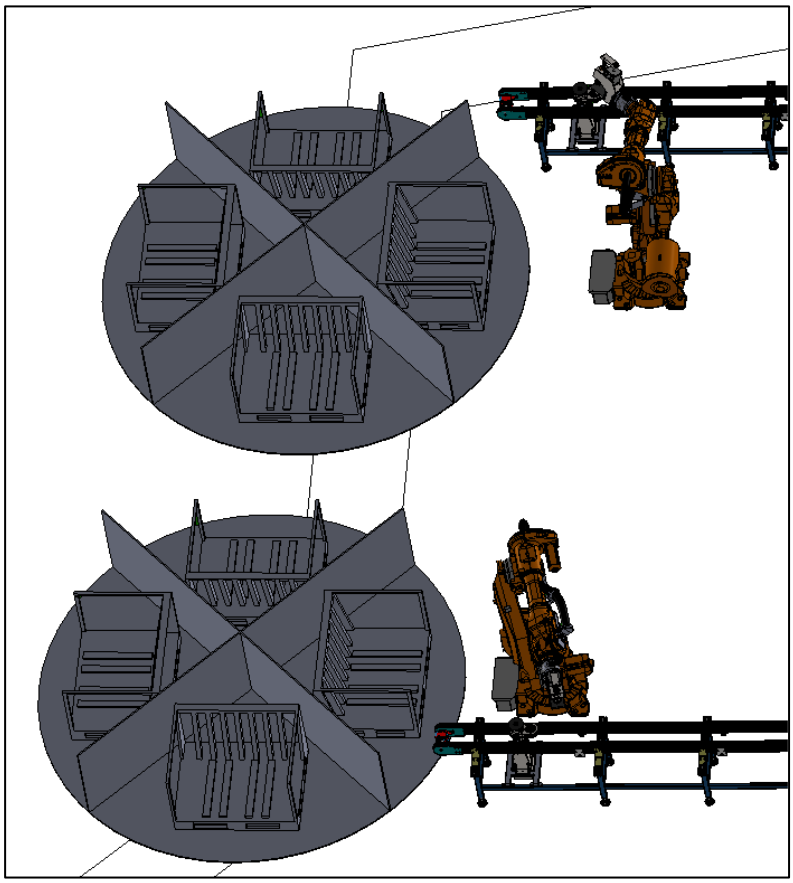
*Obr. 10 3D modelu schématu – Varianta B*

### 2.1.3 Varianta C – čtyřpozicový stůl

Varianta s použitím otočného stolu se 4 pozicemi, kde jedna paleta je nakládána pomocí robota, druhá je ručně balena, na třetí pozici je odvážena, ale zároveň ještě i na této pozici může být balena v případě vzniku časové prodlevy, poslední pozice je tey řešena jako rezervní prázdná paleta, která předchází možnému výpadku ve výrobě.



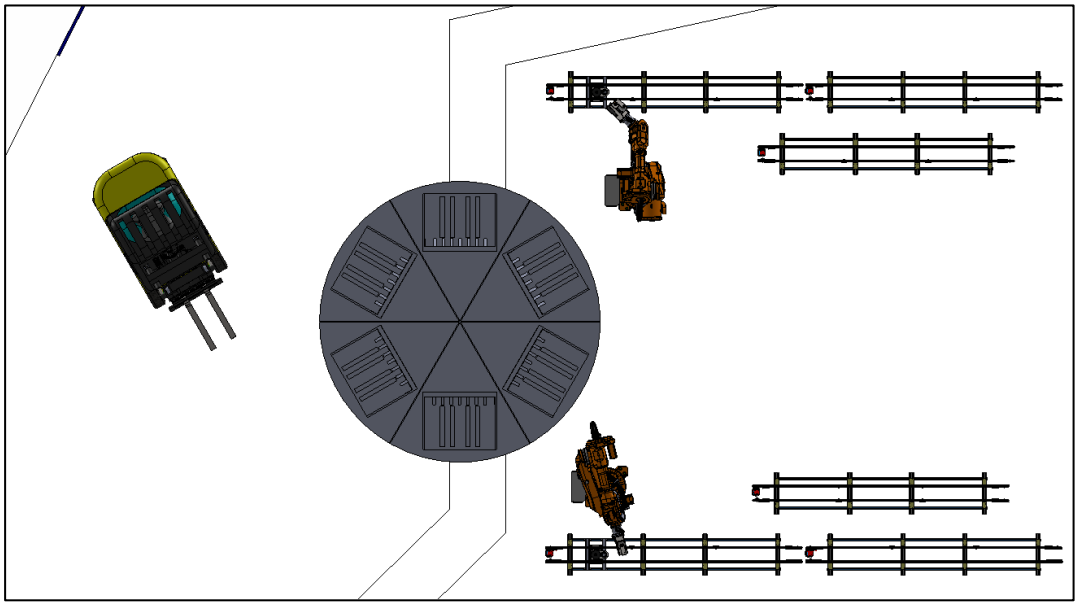
*Obr. 11 Princip automatické manipulace na konci linky CD 71 – Varianta C*



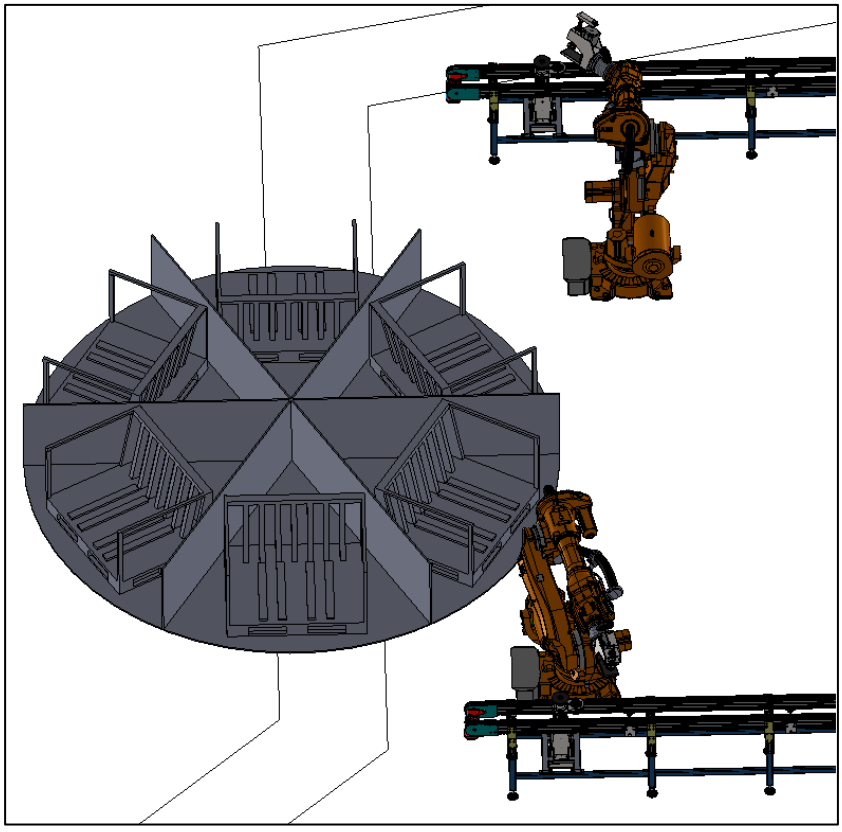
*Obr. 12 3D modelu schématu – Varianta C*

### 2.1.4 Varianta D – šestipozicový stůl

Tato varianta je založena na využití jednoho velkého otočného stolu se šesti pozicemi, kde vždy dvě sousední jsou nakládány roboty. Nevýhoda této varianty spočívá v tom, že na lince v předchozí části probíhá vizuální kontrola, kterou provádějí zaměstnanci, jejichž jediná přístupová cesta vede prostorem mezi finálními linkami, z tohoto důvodu bude muset být přes dopravník instalována lávka, po které se budou moci pracovníci přesouvat na pracoviště vizuální kontroly. Varianta poskytuje dostatečný čas pro zabalení palety a její následný odvoz.



*Obr. 13 Princip automatické manipulace na konci linky CD 71 – Varianta D*



*Obr. 14 3D model schématu – Varianta D*

### 2.1.5 Rozhodovací analýza pro výběr nejlepší varianty

Rozhodovací analýza byla provedena na základě šesti srovnávacích kritérii – investiční náklady, bezpečnost pracoviště, existence rezervní paletu použitelné v případě prodlevy při balení, míra změny současného layoutu vykládky a dostupnost pro vysokozdvižný vozík. Při rozhodovací analýze byl také brán ohled na tři rizika – bezproblémovost a složitost konstrukční realizace, (ne)dostatek kvalitní obsluhy a bezpečnost obsluhy i procházejících pracovníků na pracoviště vizuální kontroly.

*Tab. 1 Tabulka rozhodovací analýzy*

| Párové srovnání kriterií | | | | Matice užitnosti alternativ | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | X | | A | | B | | C | | D | |
| | počet | pořadí | | Hodnota | | Hodnota | | Hodnota | | Hodnota | | Hodnota | |
| název kriteria | voleb | významnosti | váha | Prostá | Vážená | Prostá | Vážená | Prostá | Vážená | Prostá | Vážená | Prostá | Vážená |
| investiční náklady | 5 | 1 | 6 | 100 | 600 | 100 | 600 | 80 | 480 | 60 | 360 | 40 | 240 |
| bezpečnost | 4 | 2 | 5 | 100 | 500 | 100 | 500 | 100 | 500 | 100 | 500 | 80 | 400 |
| rezervní prázná paleta | 1 | 5 | 2 | 100 | 200 | 0 | 0 | 30 | 30 | 100 | 200 | 90 | 180 |
| změna současného layoutu | 0 | 6 | 1 | 100 | 100 | 25 | 25 | 50 | 50 | 75 | 75 | 75 | 75 |
| pohodlnost ručního balení | 2 | 4 | 3 | 100 | 300 | 25 | 75 | 60 | 180 | 80 | 240 | 70 | 210 |
| obslužnost VZV | 3 | 3 | 4 | 100 | 400 | 80 | 320 | 50 | 200 | 90 | 360 | 70 | 280 |
| CELKEM | | | | | 2100 | 1520 | | 1440 | | 1735 | | 1385 | |
| UŽITNOST V RELATIVNÍM VYJÁDŘENÍ [%] | | | | | | 72% | | 68,50% | | 82,50% | | 66% | |
| POŘADÍ ALTERNATIV PODLE UŽITNOSTI | | | | | | 2 | | 3 | | 1 | | 4 | |

| Párové srovnání rizik | | | | Matice rizik alternativ | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nepříznivé jevy (rizika) | | | | | | A | | B | | C | | D | |
| bezproblémová realizovatlnost | 1 | 2 | 2 | 100 | 200 | 10 | 20 | 15 | 30 | 20 | 40 | 25 | 50 |
| nedostatek kvalitní obsluhy | 0 | 3 | 1 | 100 | 100 | 15 | 15 | 10 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| bezpečnost obsluhy | 2 | 1 | 3 | 100 | 300 | 30 | 90 | 20 | 60 | 10 | 30 | 25 | 75 |
| CELKEM | | | | 600 | | 125 | | 110 | | 80 | | 135 | |
| RIZIKA V RELATIVNÍM VYJÁDŘENÍ | | | | | | 21% | | 18% | | 13% | | 22,50% | |
| POŘADÍ PODLE RIZIK | | | | | | 3 | | 2 | | 1 | | 4 | |
| VÝSLEDNÝ EFEKT = užitnost - rizika v rel. Vyjádření | | | | | | 51% | | 50,50% | | 69,50% | | 43,50% | |
| POŘADÍ ALTERNATIV PODLE VÝSLEDNÉHO EFEKTU | | | | | | 2 | | 3 | | 1 | | 4 | |

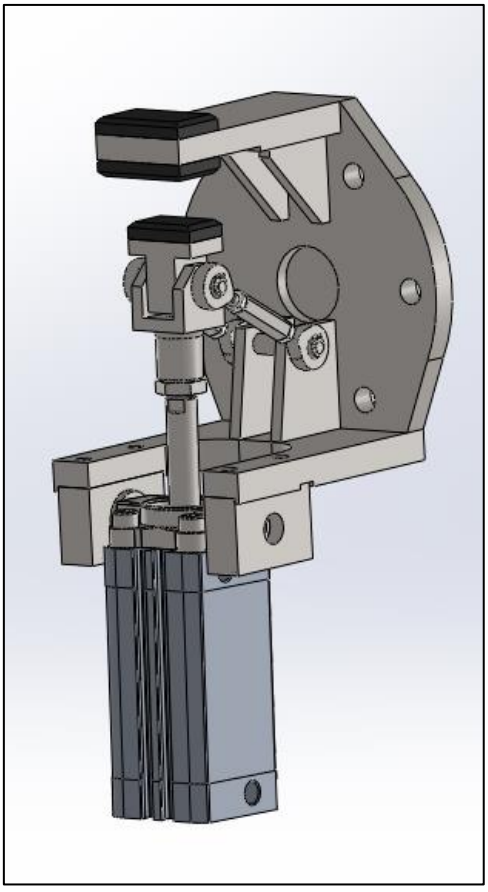
Z rozhodovací analýzy nejlépe vyšlo řešení C – čtyřpozicový stůl. Druhé nejvhodnější řešení se ukázala varianta A – dvoupozicový stůl, která vyšla procentuálně téměř shodná s variantou řešení B – třípozicový stůl. Nejhůře vychází z rozhodovací analýzy vychází řešení D – šestipozicový stůl.

## 2.2 Koncepční řešení chapadla pro realizaci automatického balení

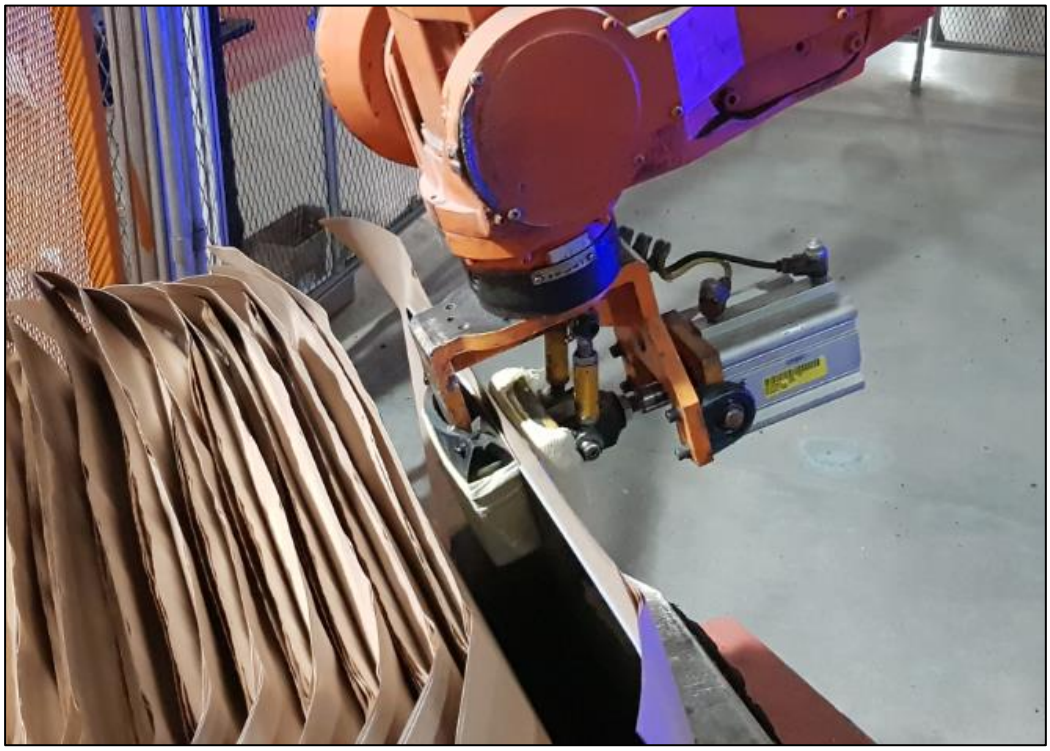
Chapadlo musí splňovat základní požadavek, kterým je tloušťka stohu skla včetně připočítaného zdvihu umožňujícího nepřesnost najetí a vyjetí chapadla a eliminující nepřesnosti spojené s programováním a nepřesnostmi v rozmístění robotu vůči periferním zařízením a nastavení pozic. Chapadlo bude proto navrženo tak, aby jeho sevření dávalo zdvih mezi pevným a pohyblivým úchopným prvkem 15 mm a otevřená pozice byla 90 mm.

### 2.2.1 Varianta A – chapadlo inspirované existujícím chapadlem v AGC

Toto chapadlo vychází z konstrukce již používaného chapadla v jiném závodě AGC. (obr. 16) Je složeno ze svařovaného rámu, na kterém je pomocí kyvné příruby uložen pneumatický válec, na kterém je pohyblivý úchopný prvek. T Tento úchopný systém dovoluje dodatečné kompenzace a je schopen se přizpůsobit nepřesnosti uchopení a tvaru skla. Díky tomu se zmenšuje síla potřebná k bezpečnému a stabilnímu uchopení



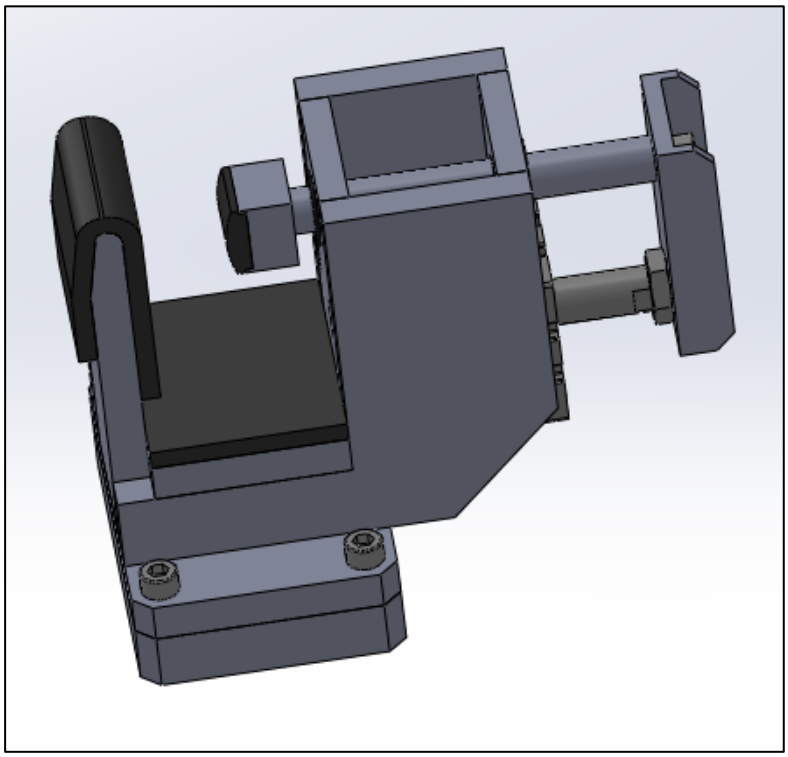
*Obr. 15 Chapadlo inspirované existujícím chapadlem v AGC – 3D model.*



*Obr. 16 Chapadlo využívané v jiném závodě AGC*

### 2.2.2 Varianta B – chapadlo s posuvným úchopným prvkem

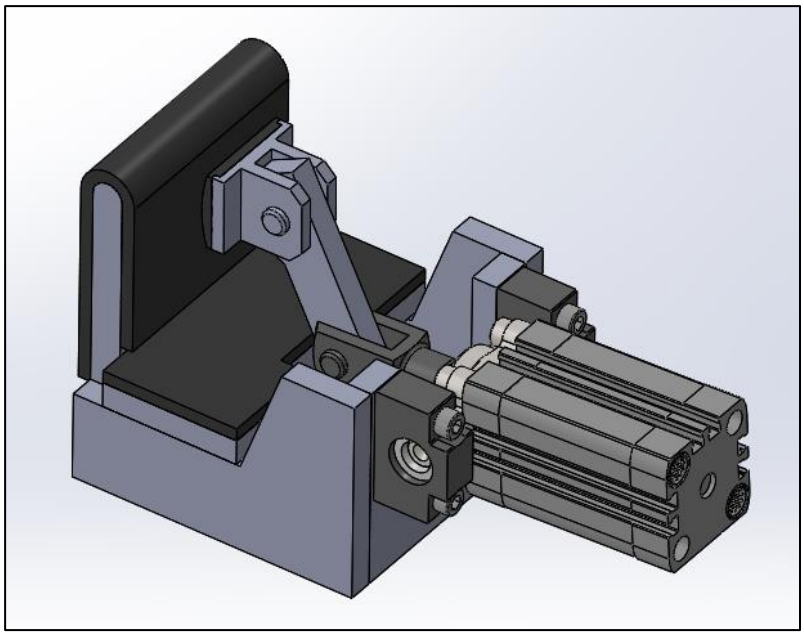
Tato varianta je založena na nepřímém lineárním pohybu vyvozeným pneumatickým válcem, který je pevně smontován s rámem.



*Obr. 17 chapadlo s posuvným úchopným prvkem*

### 2.2.3 Varianta C – chapadlo s rotačním úchopným prvkem

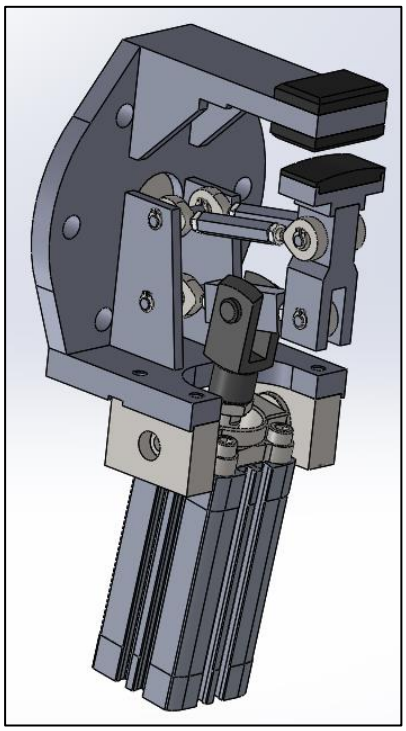
Chapadlo s rotačním úchopným prvkem je založeno na rámu, na kterém je pomocí kyvné příruby přidělán pneumatický válec. Toto uložení umožnuje transformaci lineárního pohybu na pohyb otočný. Hlavní výhoda tohoto řešení spočívá v dobrém styku pohyblivého úchopného prvku se stohem skel.



*Obr. 18 Chapadlo s rotačním úchopným prvkem*

### 2.2.4 Varianta D – chapadlo založen na využití paralelogramu

Varianta založena na využití paralelogramu vychází z modifikovaného návrhu chapadla inspirovaného stávajícím chapadlem v AGC (obr. XY). Na pohyblivém úchopném prvku jsou pomocí otočných kloubových hlavic uloženy tyče, které spojují pohyblivý úchopný prvek s rámem, ke kterému jsou obdobně připojeny. Toto řešení zajišťuje dodržení rovnoběžnosti mezi přírubou PR a pohyblivým úchopným prvkem.



*Obr. 19 Chapadlo založené na využití paralelogramu*

### 2.1.5 Rozhodovací analýza pro výběr nejlepší varianty

Volba chapadla byla provedena s porovnáním pěti srovnávacích kritérii – investiční náklady, rozsah uchopování, kompaktnost, hmotnost a bezporuchovost. Do volby byly také započítaná tři rizika – přesnost uchopení, opravitelnost a opakovatelná přesnost uchopení.

*Tab. 2 Tabulka rozhodovací analýzy pro výběr chapadla*

| Párové srovnání kriterií | | | | Matice užitnosti alternativ | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | X | | A | | B | | C | | D | |
| | počet | pořadí | | Hodnota | | Hodnota | | Hodnota | | Hodnota | | Hodnota | |
| název kriteria | voleb | významnosti | váha | Prostá | Vážená | Prostá | Vážená | Prostá | Vážená | Prostá | Vážená | Prostá | Vážená |
| investiční náklady | 1 | 4 | 2 | 100 | 200 | 50 | 100 | 70 | 140 | 70 | 140 | 50 | 100 |
| rozsah uchopování | 0 | 5 | 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 80 | 80 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| kompaktnost | 2 | 3 | 3 | 100 | 300 | 40 | 120 | 80 | 240 | 70 | 210 | 60 | 180 |
| hmotnost | 3 | 2 | 4 | 100 | 400 | 80 | 320 | 75 | 300 | 50 | 200 | 75 | 300 |
| bezporuchovost | 4 | 1 | 5 | 100 | 500 | 55 | 275 | 80 | 400 | 60 | 300 | 55 | 275 |
| CELKEM | | | | | 1500 | 915 | | 1160 | | 940 | | 945 | |
| UŽITNOST V RELATIVNÍM VYJÁDŘENÍ [%] | | | | | | 61% | | 77,00% | | 62,50% | | 63% | |
| POŘADÍ ALTERNATIV PODLE UŽITNOSTI | | | | | | 4 | | 1 | | 3 | | 2 | |

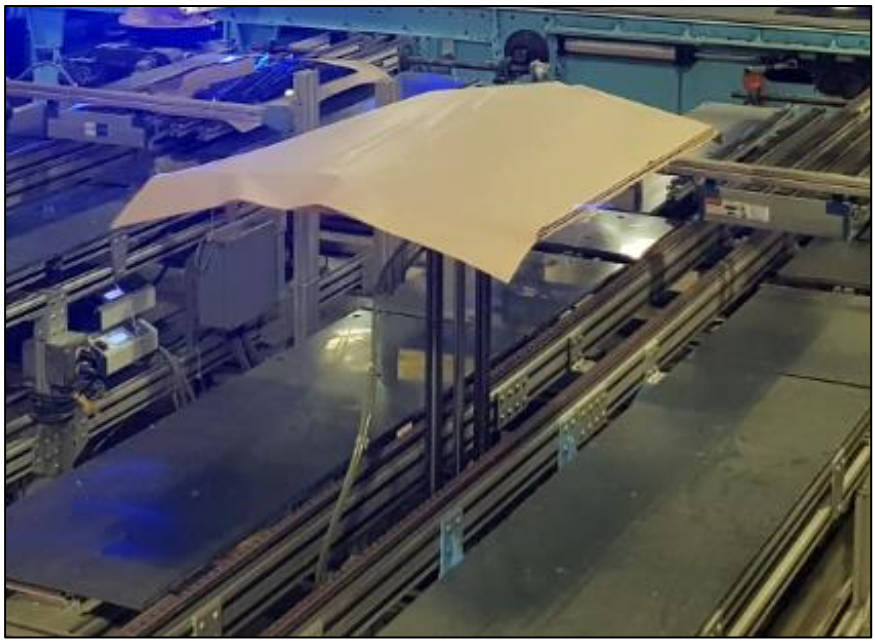
| Párové srovnání rizik | | | | | Matice rizik alternativ | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nepříznivé jevy (rizika) | | | | | | A | | B | | C | | D | |
| přesnost uchopení | 0 | 3 | 1 | 100 | 300 | 20 | 60 | 15 | 45 | 20 | 60 | 20 | 60 |
| opravitelnost | 2 | 1 | 3 | 100 | 100 | 50 | 50 | 60 | 60 | 60 | 60 | 50 | 50 |
| opakovatelná přesnost uchopení | 1 | 2 | 2 | 100 | 200 | 30 | 60 | 20 | 40 | 40 | 80 | 20 | 40 |
| CELKEM | | | | 600 | | 170 | | 145 | | 200 | | 150 | |
| RIZIKA V RELATIVNÍM VYJÁDŘENÍ | | | | | | 28% | | 24% | | 33% | | 25,00% | |
| POŘADÍ PODLE RIZIK | | | | | | 3 | | 1 | | 4 | | 2 | |
| VÝSLEDNÝ EFEKT = užitnost - rizika v rel. Vyjádření | | | | | | 34% | | 53% | | 29,50% | | 38% | |
| POŘADÍ ALTERNATIV PODLE VÝSLEDNÉHO EFEKTU | | | | | | 3 | | 1 | | 4 | | 2 | |

Z rozhodovací analýzy výběru chapadla vyšla nejlépe varianta B – chapadlo s posuvným úchopným prvkem. Jako druhé nejvhodnější řešení se ukázala varianta D – chapadlo založené na využití paralelogramu, následuje varianta A – chapadlo inspirované existujícím chapadlem v AGC a na posledním místě je varianta C – chapadlo s rotačním úchopným prvkem.

## 2.3 Koncepční řešení zvedáku stohů skla

Zvedák stohů skla je složen z pneumatického válce sloužícího pro zvedání skla, rotačního servopohonu (umístěného mimo osu pneumatického válce) pro lepší kompatibilitu, pro přesné pozicování stohu skla a aktivní podtlakové přísavky sloužící k držení stohu skla.

Zvedák je potřeba navrhnout tak, aby byl schopný zvedat stohy sklo o maximální návrhové hmotnosti 55,6 kg a nemohlo dojít ke kolizi zvedáku s dopravníkem, ale zároveň tak, aby byla snadná jeho montáž do stávajícího dopravníku s co nejméně nutnými úpravami.

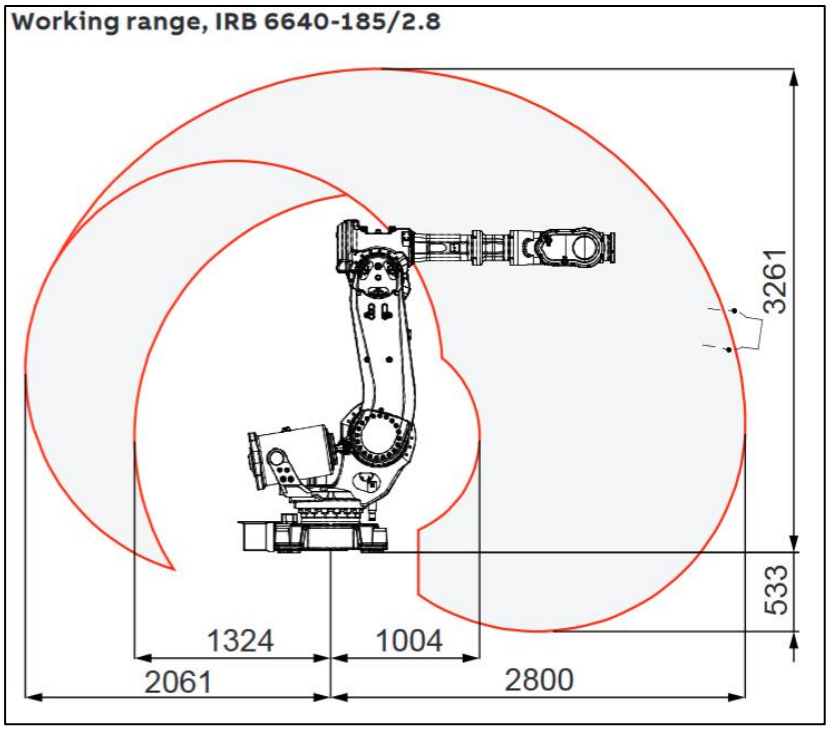


*Obr. 20 Zvedák skla v jiném závodě AGC*

## 2.4 Volba robotu

Pro danou aplikaci paletizace je nejvhodnější využití angulárního robota. Volba robota přímo ovlivňuje tvar chapadla. Chapadlo musí být navrhnuto tak, aby bylo kompatibilní s přírubou robota. Pro danou manipulační úlohu byl zvolen robot od firmy ABB a to konkrétně IRB 6640-185/2,8. Tento robot má nosnost 185 kg a maximální dosah 2,8 m.

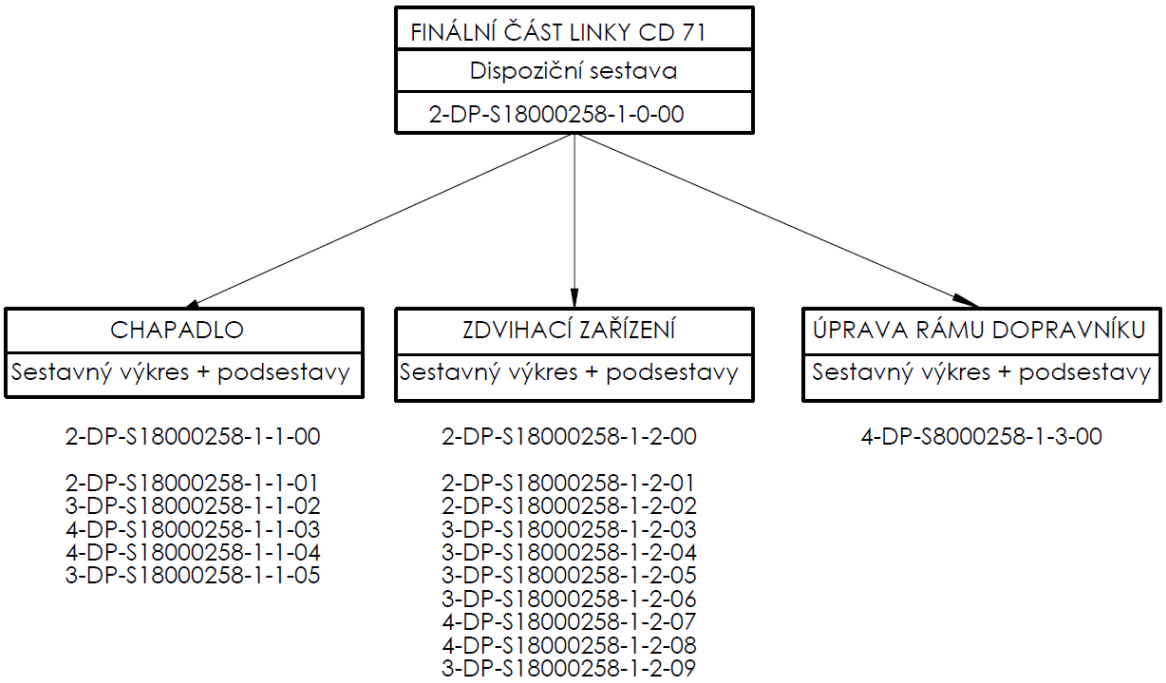
*Obr. 21 Průmyslový robot IRB 6640-185/2,8 [1]*



*Obr. 22 Pracovní prostor PR IRB 6640-180/2,8 [2]*

# 3. Konstrukční řešení

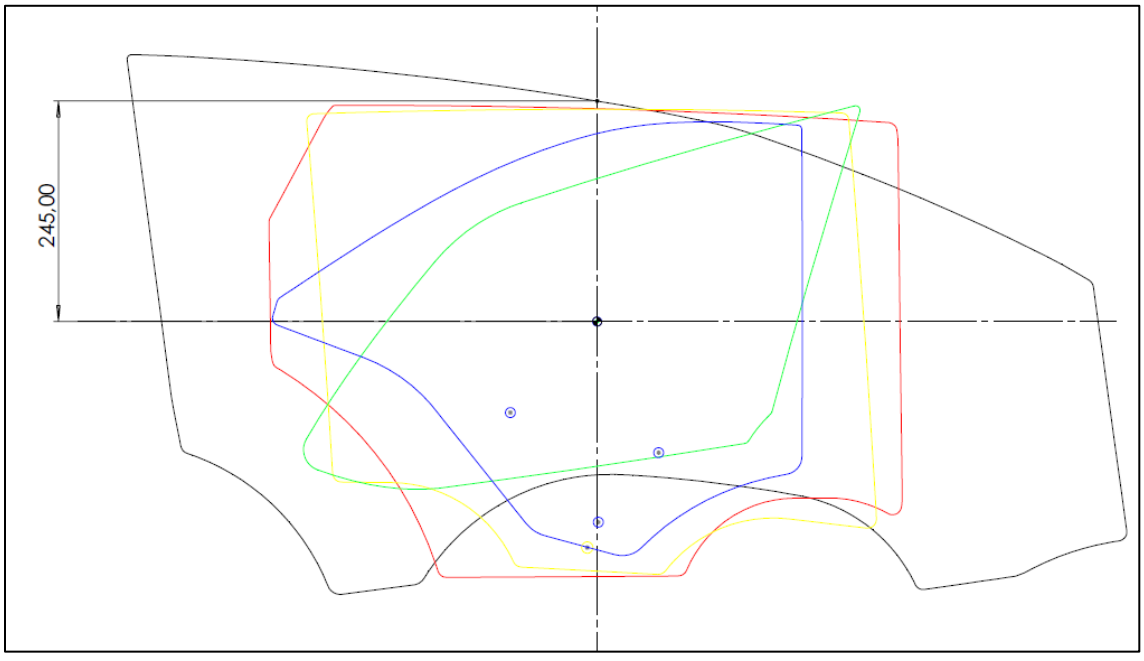
Konstrukční řešení je členěno do několika částí (obr. XY). Skládá se z dispoziční sestavy finální části linky CD 71 a ze třech podsestav dílčích uzlů. První podsestava obsahuje zdvihací zařízení, druhou tvoří chapadlo a poslední je vložení a úprava rámu dopravníku.




*Obr. 23 Přehled výkresové dokumentace*

## 3.1 Konstrukční řešení chapadla

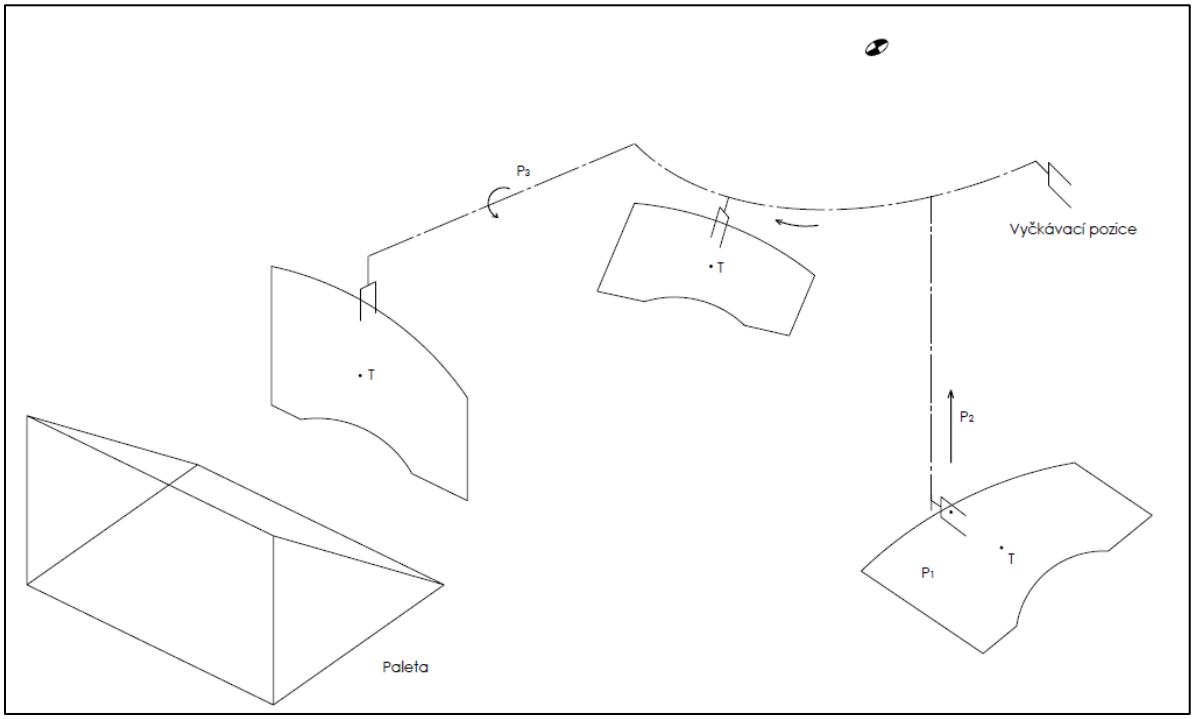
Na obr. 24 jsou zástupci několika skel vyráběných na lince, položených na sebe tak, aby jejich těžiště leželo v jednom bodě. Z tohoto obrázku je vidět, že maximální vzdálenost těžiště od okraje osy, a tedy okraje uchopení chapadlem, je 245 mm.




*Obr. 24 Těžiště skel*

### 3.1.1 Manipulační úloha

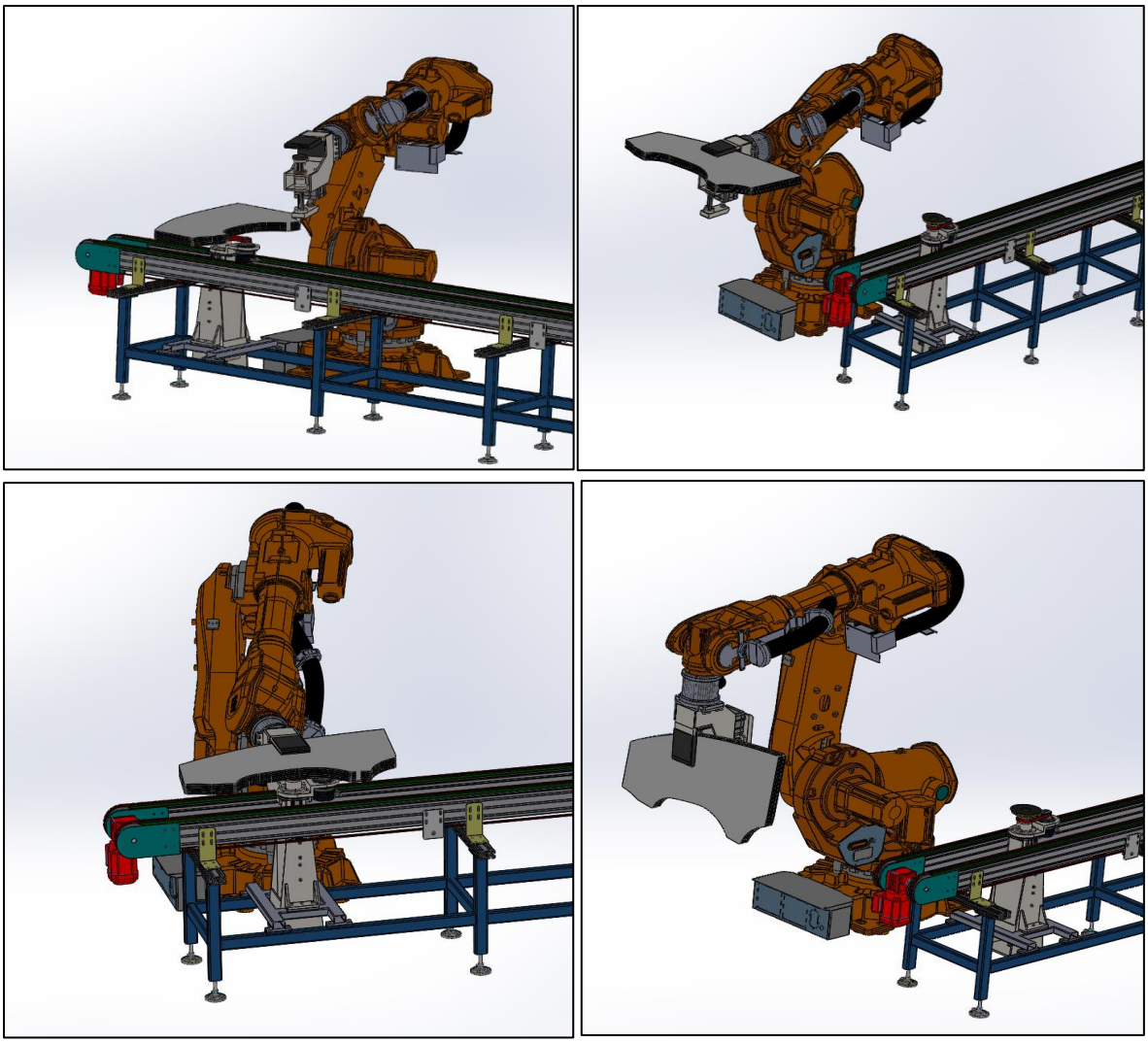
Pro správné určení úchopné síly potřebné pro stabilní uchopení stohu skla je potřeba určit úchopné síly v jednotlivých fází pohybu a následně vybrat sílu, která je nejvyšší, a dle této hodnoty dimenzovat pneumatický válec využitý v chapadlu. Na obr. 25 je vidět schéma manipulační úlohy a na obr. 26 je vidět polohu chapadla při jednotlivých fází manipulační úlohy.



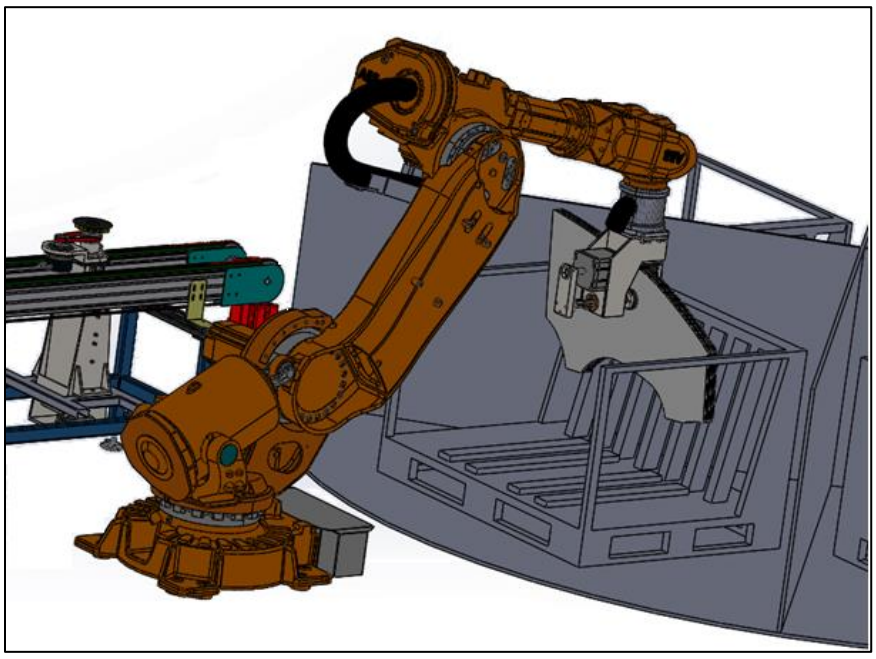

*Obr. 25 Schéma manipulační úlohy*

Rozbor dynamického zatěžování byl realizován v souladu s členěním manipulační úlohy. Popis manipulačního cyklu:

P0 – P1 najetí robota do odnímací pozice a uchopení
P1 – P2 zdvih stohu skel (s horizontální rovinou)
P2 – P3 otočení robotu před odkládací pozici
P3 – P4 sklopení chapadla a stohu skel do vertikální roviny a najetí do odkládací pozice nad paletu
P4 – P5 najetí svisle do odkládací pozice a uvolnění chapadla
P5 – P6 přitlačení



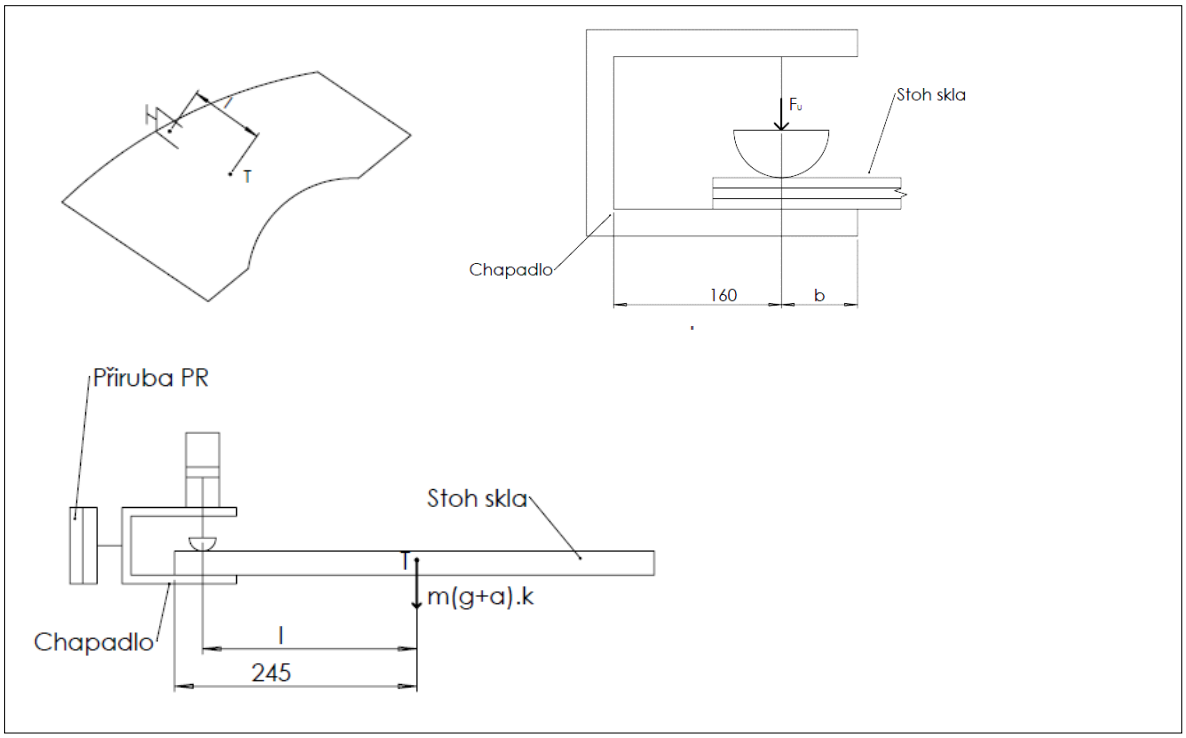
Obr. 26 Členění manipulačního cyklu



Obr. 27 Umístění skla do palety

### *A. Výpočet úchopné síly v první fázi pohybu P1 – P2*

Fáze pohybu P1 – P2 spočívá v uchopení stohu skel s horizontální rovinou z výchozí pozice na dopravníku. Toto uchopení je excentrické v místě okraje skla. Pohyb v této fázi manipulační úlohy je vertikální směrem od dopravníku se zvedákem [3].




*Obr. 28 Uchopení a působení sil při první fázi pohybu*

$F_{U1}$ … úchopná síla v pozici P1 v okamžiku rozběhu pohybu směrem vzhůru vychází ze zatížení sklem o hmotnosti m = 55,6 kg, zrychlení pohybu a = 5 $m.s^{-2}$, počítáno s koeficientem bezpečnosti k = 2

Platí $F_{U1} = F_{U1}' + F_{U2}''$ (1)

Kde $F_{U1}'$ je síla k překonání tíhového zrychlení a setrvačné síly (2);
$F_{U2}'$ je síla k překonání účinku klopného momentu uchopení pro b = 50, l = 100, l zvoleno na základě znalosti vzdálenosti těžiště od okraje skla a na volbě rozměrů chapadla (obr. 28) (3)

$$F_{U1}' = m.(g+a).k = 55{,}6.(9{,}81+5).2 = 1646{,}9\ N \quad (2)$$

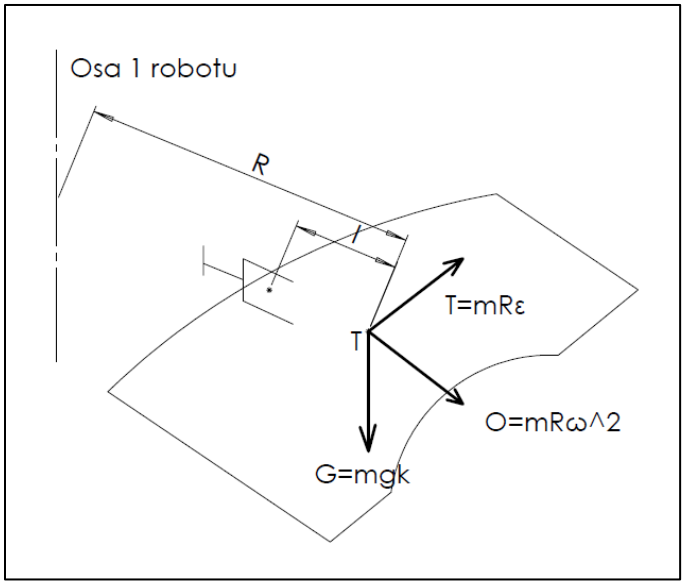
$$F_{U1}'' = m.(g+a).k.\frac{l}{b} = 55{,}6.(9{,}81+5).\ 2.\frac{100}{50} = 3293{,}8\ N \quad (3)$$

Na pohyblivý úchopný prvek působí pouze síla $F_{U1}''$

Celková síla $F_{U1}$ je dána součtem
$F_{U1} = F_{U1}'' = 3293{,}8$ N

### *B. Výpočet FU2 pro druhou fázi pohybu P2 – P3*

Sledovaný pohyb představuje zatížení třemi silami, pro jejichž eliminaci je nutné vypočítat princip superpozice síly. Při tomto pohybu působí značné dynamické síly.




*Obr. 29 Působení sil při druhé fázi pohybu*

$F_{U2}$‘ je úchopná síla potřebná k eliminaci síly G;
$F_{U2}$‘‘ je síla, která je potřeba k eliminaci síly O;
$F_{U2}$‘‘‘ je síla potřebná k eliminaci síly setrvačné při rozběhu T;

Z uvažovaného zadání platí:

Gravitační sílu působící na stoh skla lze určit ze stahu (4)

$$G = m.g.k = 55{,}6.\ 9{,}81.\ 2 = 1090{,}9\ N \quad (4)$$

Během definovaného pohybu působí na stoh skla při manipulaci odstředivá síla (5)

$$O = m.R.\omega^2.k = 55{,}6\ .1{,}5.\ \left(\frac{2\pi}{3}\right)^2 .\ 2 = 731{,}7\ N \quad (5)$$

Zrychlující síla je dána vztahem (6)

$$T = m.R.\varepsilon.k = 55{,}6.\ 1{,}5.\ 3.\ 2 = 500{,}4\ N \quad (6)$$

Kde R = 1,5 m což je poloměr otáčení robotu;
$\omega = \frac{2\pi}{3}$ rad. $s^{-1}$ je úhlová rychlost při otáčení;
$\varepsilon$ = 3 rad. $s^{-2}$ je uvažované úhlové zrychlení;
Tyto hodnoty jsou voleny s ohledem na velkou hmotnost manipulovaného objektu a na dostatečný čas pro manipulaci.[4]

Analogicky s výpočtem výše (3) platí;

$$F'_{U2} = m.g.k\frac{l}{b} = 55{,}6.9{,}81.2.\ \frac{100}{50} = 2182{,}7\ N \tag{7}$$

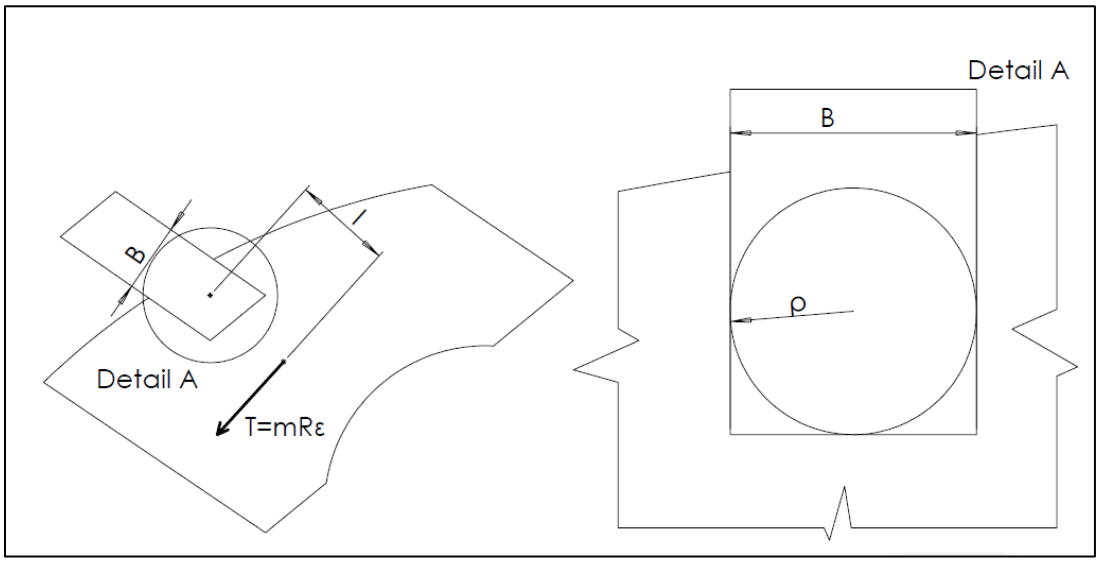
Pro výpočet $F''_{U2}$ bude platit vzorec (8);

$$O = 2T_2 = 2.F''_{U2}\ .\ \mu \tag{8}$$

kde μ = 0,4 je koeficient tření sklo x pryž pěnová technická [5],
ze vzorce (8) lze vyjádřit vzorec (9) pro výpočet $F''_{U2}$;

$$F''_{U2} = \frac{O}{2\mu} = \frac{731{,}7}{2.0{,}4} = 914{,}7\ N \tag{9}$$

Pro výpočet $F'''_{U2}$ platí podle teorie třecích spojek;




*Obr. 30 Schéma a působení sil pro výpočet $F'''_{U2}$*

Vyvozený kroutící moment lze určit dle vzorce (10);

$$M_k = T.l = 500{,}4.0{,}1 = 50{,}04\ Nm \tag{10}$$

Moment zachycený spojkou;

$$M_k = M_{t\ nahoře} + M_{t\ dole} = F''_{U2}.\mu.(R_{red}^{nahoře} + R_{red}^{dole}) \tag{11}$$

Kde μ = 0,4 koeficient tření;

$$R_{red}^{nahoře} = \frac{2}{3}\rho = \frac{2}{3}.\frac{B_{nahoře}}{2} = \frac{2}{3}.\frac{80}{2} = 26{,}7\ mm = 0{,}0267m \tag{12}$$

$$R_{red}^{dole} = \frac{2}{3}\rho = \frac{2}{3}.\frac{B_{dole}}{2} = \frac{2}{3}.\frac{140}{2} = 46{,}7\ mm = 0{,}0467m \quad (13)$$

Pak platí;

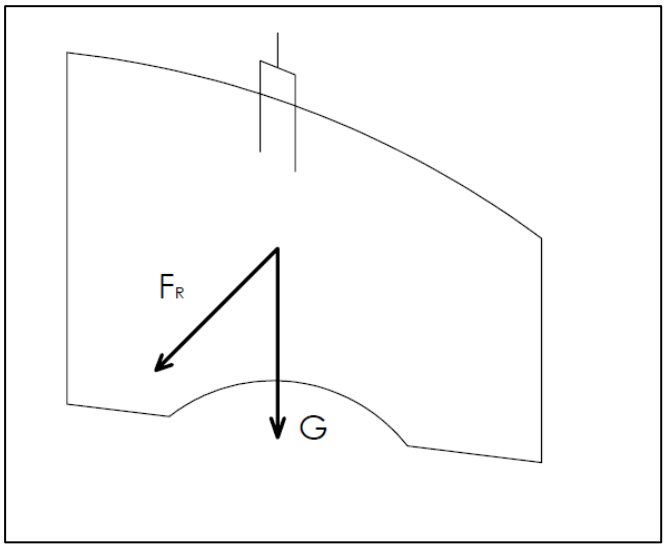
$$F'''_{U2} = \frac{M_k}{\mu.R_{red}} = \frac{50{,}04}{0{,}4.(0{,}027 + 0{,}047)} = 1690{,}6\ N \quad (14)$$

Pro výslednou sílu;

$F_{U2} = F_{U2}' + F_{U2}'' + F_{U2}''' = 2182 + 914{,}7 + 1690{,}6 = 4787{,}3$ N (15)

### C. *Výpočet úchopné síly pro odkládací fázi P3 – P5*

Odkládací fáze je složena ze dvou pohybů. První pohyb je sklopení chapadla se stohem skla z horizontální roviny do roviny vertikální a následné najetí do odkládací pozice nad paletu;




*Obr. 31 Působení sil při třetí fázi pohybu*

Pro určení síly $F_{U3}$ platí;

$$F_{U3} = F_{U3}' + F_{U3}'' \quad (16)$$

$F_{U3}'$ je síla potřebná pro eliminaci gravitační, popř, zrychlující síly;

$F_{U3}''$ je síla potřebná pro eliminaci klopného momentu od síly $F_R$;

Podobně jako ve vztahu výše (2), platí;

$$F'_{U3} = \frac{m.(g+a).k}{2.\mu} = \frac{55{,}6.(9{,}81+5).2}{2.0{,}4} = 2058{,}6\ N \quad (17)$$

A pro rozběhy horizontálně se svisle uchopeným sklem;

$$F''_{U3} = m.a.k.\frac{l}{b} = 55{,}6.5.2.\frac{100}{50} = 1112\ N \quad (18)$$

Celková síla pro danou oblast manipulační úlohy;

$$F_{U3} = F_{U3}' + F_{U3}'' = 2058{,}6 + 1112 = 3170{,}6\ N \quad (19)$$

Z výpočtu je patrné, že k největšímu zatížení dochází ve druhé fázi pohybu, a to při otáčení robotu kolem 1 osy před odkládací pozici. Při tomto pohybu je potřeba, aby pneumatický válec byl schopný udržet zatížení větší než 4787,3 N.

### 3.1.2 Volba prvků

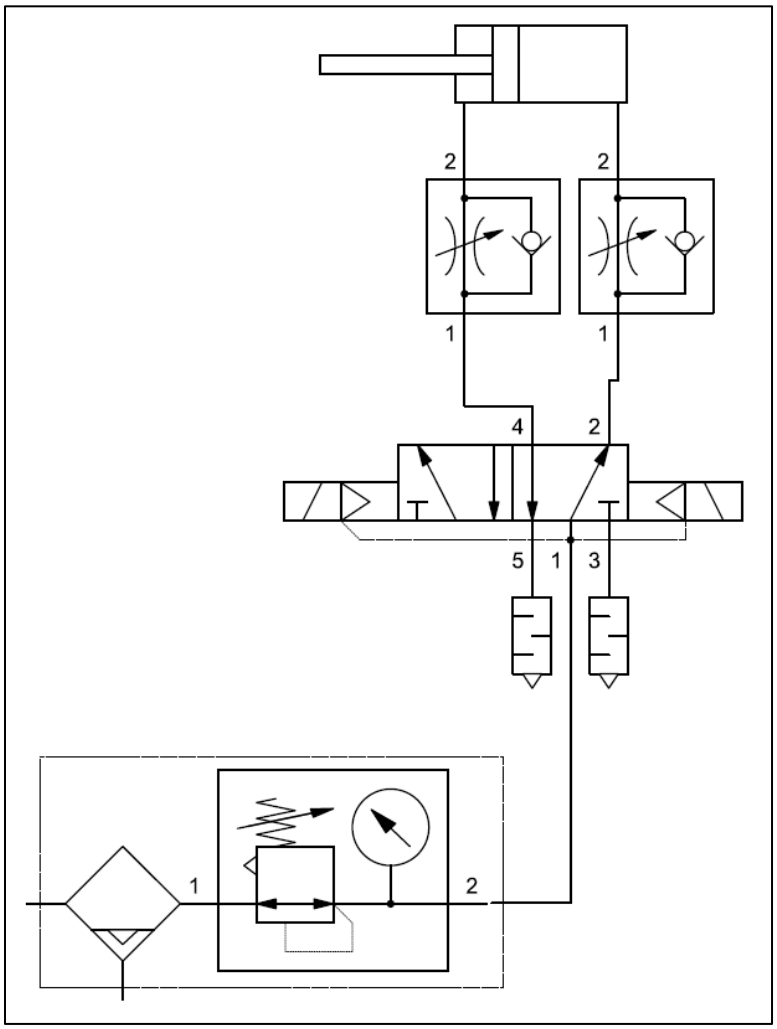
#### *3.1.2.1 Pneumatický válec*

Z výpočtu lze zvolit velikost pneumatického válce. Je potřeba volit takový válec, který bude mít teoretickou sílu při normálním provozním tlaku – 6 barů a pohybu vzad větší než 4787,3 N. Byl zvolen pneumatický válec od firmy Festo a to kompaktní válec ADN. Pro požadovanou úchopnou sílu je potřeba volit válec s průměrem pístnice 125 mm , který poskytuje teoretickou sílu při 6 barech a pohybu vzad 7069 N. Z požadavku na maximální a minimální rozevření chapadla je potřeba volit pneumatický válec se zdvihem minimálně 80 mm.

*Obr. 32 Pneumatický válec ADN – 125 – 80 [6]*

### *3.1.2.2 Schéma pneumatického zapojení*

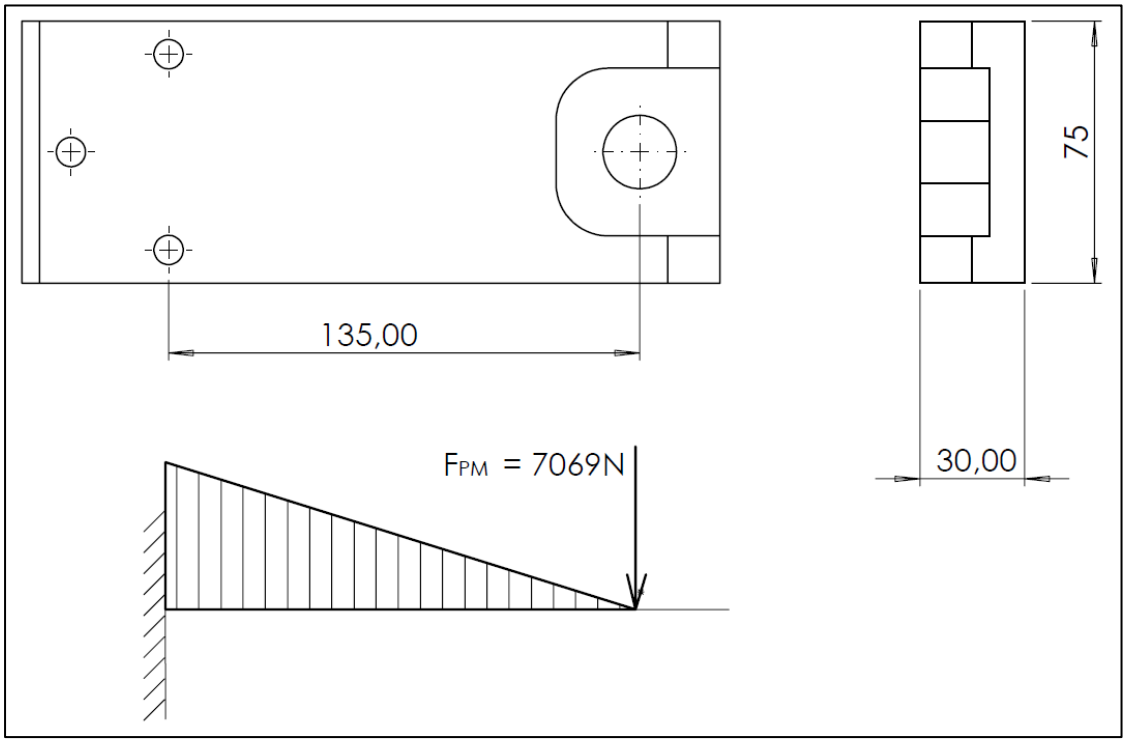
Na obr. 33 je vidět schéma zapojení chapadlo s výchozí polohou vyjetého pneumatického válce. Ovládání je realizováno elektromagnetický rozvaděčem 5/2.




*Obr. 33 Schéma zapojení chapadla*

### 3.1.3 Pevnostní výpočet namáhaných částí

#### *3.1.3.1 Pevnostní výpočet příčníku*




*Obr. 34 Rozměrové schéma příčníku*

Průřezový modul ohybu profilu je obdélníkového tvaru o rozměrech 75x30mm (20);

$$W_0 = \frac{hb^2}{6} = \frac{75.30^2}{6} = 11250\ mm^3 \tag{20}$$

Maximální ohybový moment je dán zátěžnou silou od pneumatického válce a délku ramene na kterém působí (21) ;

$$M_{max} = F_{PM} l = 7069.0{,}135 = 954{,}3Nm \tag{21}$$

Maximální napětí pak lze určit z maximálního ohybového momentu a z celkového průřezového modulu (22);

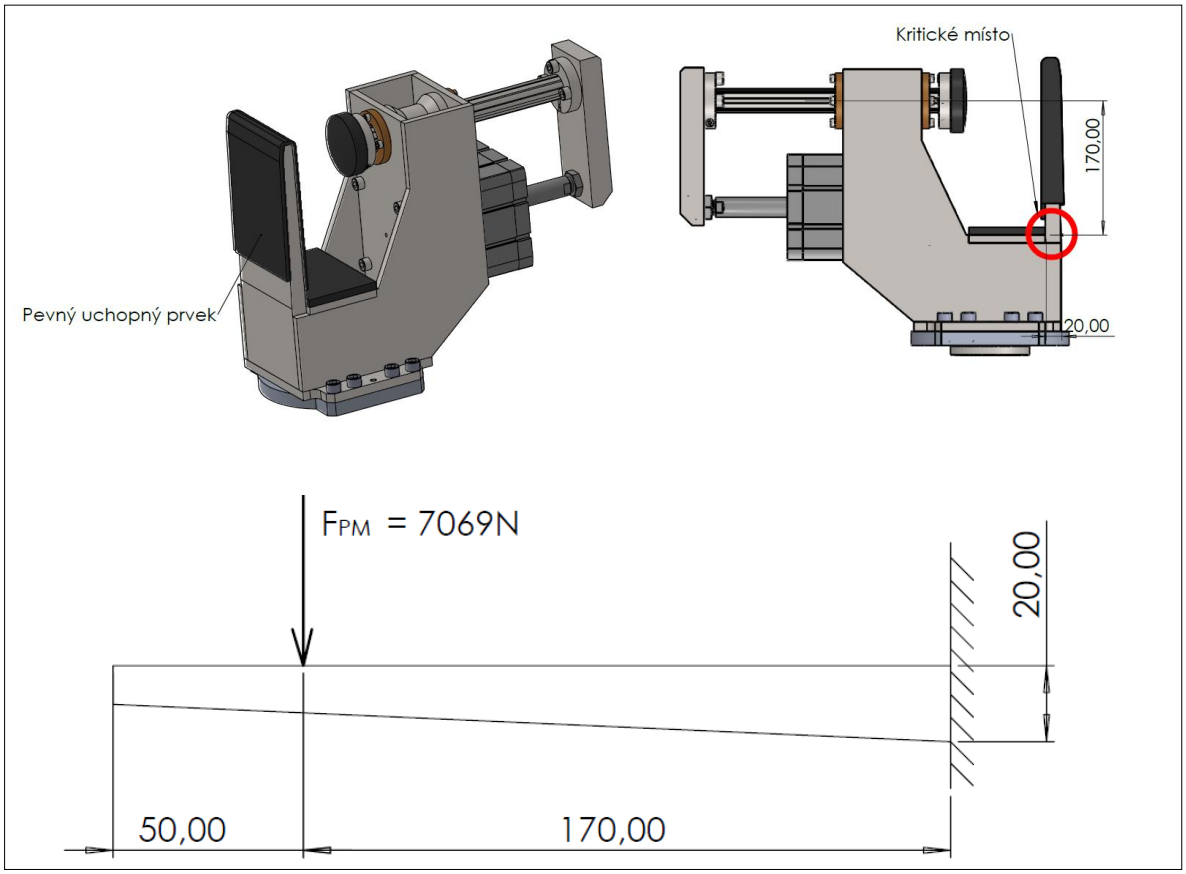
$$\sigma_{omax} = \frac{M_{max}}{W_o} = \frac{954{,}3}{11{,}250.10^{-6}} = 84{,}8MPa \tag{22}$$

Pro zvolenou míru bezpečnosti alespoň k = 2 bude nutné volit ocel 11500 s mezí kluzu Re=245 MPa, pak bezpečnost lze vypočítat ze vztahu (23);

$$k = \frac{Re}{\sigma_o} = \frac{245}{84{,}8} = 2{,}9\ Nm \tag{23}$$

což bude plně vyhovovat pro zvolenou míru bezpečnosti.

### 3.1.3.2 Pevnostní výpočet pevného úchopného prvku




*Obr. 35 Rozměrové schéma pevného úchopného prvku*

Průřezový modul ohybu pevného úchopného prvku v kritickém místě je ve tvaru obdélníku o rozměrech 135x20 mm (24)

$$W_0 = \frac{bh^2}{6} = \frac{135.20^2}{6} = 9000\ mm^3 \qquad (24)$$

Maximální ohybový moment je dán zátěžnou silou od pneumatického válce a délko ramene po kterém působí (25) ;

$$M_{max} = F_{PM} l = 7069.0{,}170 = 1201{,}7\ Nm \qquad (25)$$

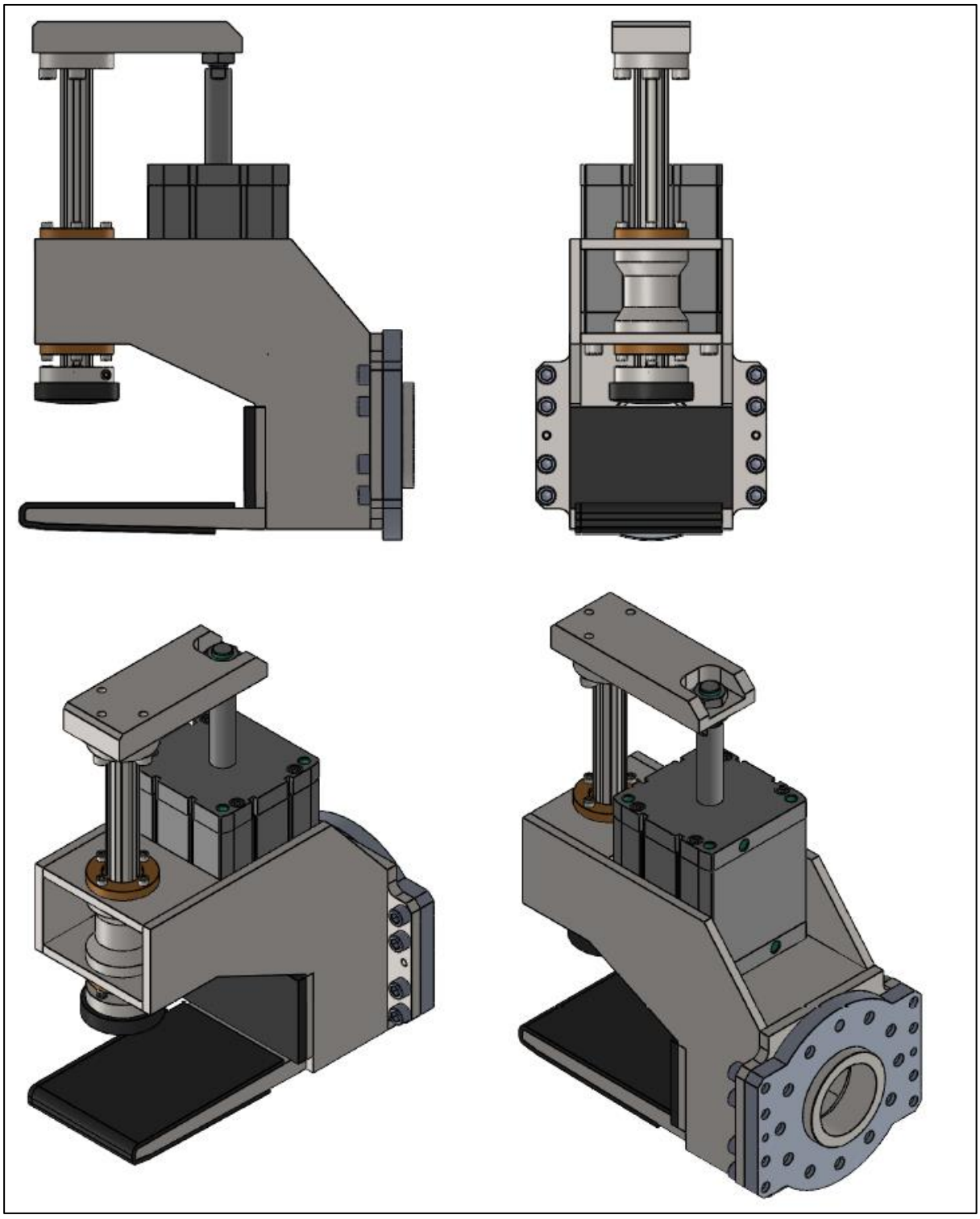
Maximální napětí lze určit obdobně jako v předchozím výpočtu z maximálního ohybového momentu a z celkového průřezového modulu (26);

$$\sigma_{omax} = \frac{M_{max}}{W_0} = \frac{1201{,}7}{9.10^{-6}} = 133{,}6\ MPa \qquad (26)$$

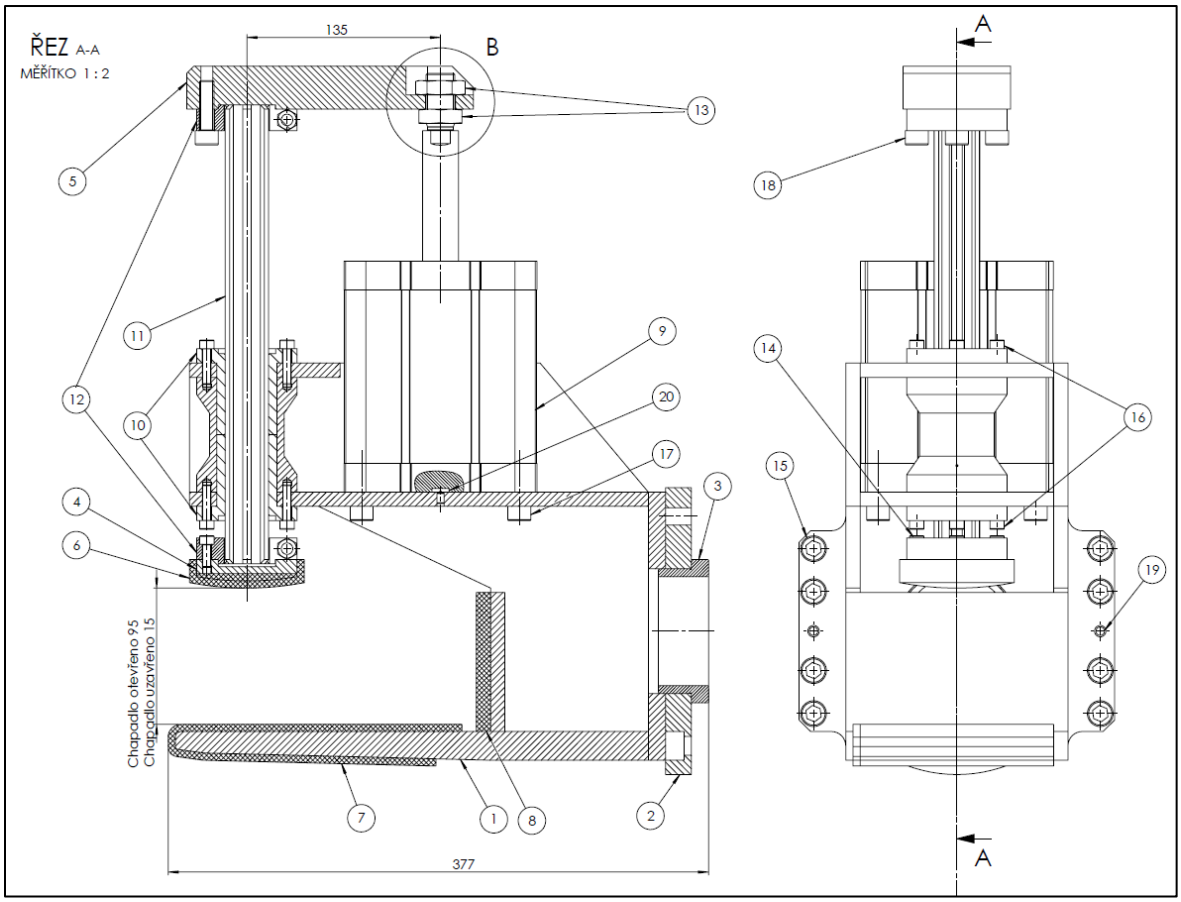
Pro zvolenou míru bezpečnosti alespoň k = 2 bude nutné volit ocel 11523 s mezí kluzu Re = 333MPa, bezpečnost lze určit dle vztahu (27); což bude plně vyhovovat pro zvolenou míru bezpečnosti.

$$k = \frac{Re}{\sigma_o} = \frac{333}{133{,}6} = 2{,}49 \qquad (27)$$

### 3.1.4 Konstrukční provedení



*Obr. 36 Konstrukční provedení chapadla*




*Obr. 37 Sestavný výkres chapadla*

Konstrukce chapadla (obr. 37) je založena na svařovaném rámu (pozice 1), ke kterému je přišroubován pneumatický válec ADN 125 se zdvihem 80 mm a vnějším závitem na pístní tyči (pozice 9). Kluzné vedení je realizováno drážkovým hřídelem, uloženým ve dvou bronzových pouzdrech KN 26x32 (pozice 10) od firmy Haberkorn. Tento způsob vedení umožnuje zachytit zatížení krouticích momentů, a přitom zajistit dlouhodobou funkci s minimálními nároky na mazaní.

Drážkovanými pouzdry prochází drážkovaná hřídel KW 26x30 o délce 320 mm (pozice 11) na jejíž koncích jsou upevněny svěrné kroužky KNR 26x30 (pozice 12). K jednomu svěrnému kroužku je přišroubován příčník (pozice 5), který je připojen pomocí dvou matic M20x1,5 (pozice 13) k pneumatickému válci. Svěrný kroužek, který je připojen k příčníku, byl upraven zvětšením děr, aby bylo možné využít větší šrouby M10x35 (pozice 18) pro větší únosnost. Na druhé straně drážkované hřídele je svěrný kroužek přišroubován k pohyblivému úchopnému prvku (pozice 4). Na pohyblivý úchopný prvek je přilepeno obložení z pěnové technické pryže (pozice 6), obložení je nalepeno ve dvou vrstvách., přičemž první vrstva o tloušťce pryže 5 mm je upravena tak, aby tvořila konvexní plochu ve formě kulového vrchlíku. Druhá vrstva technické pryže má totožnou tloušťku 5 mm.

Nepohyblivý úchopný prvek, který je součástí rámu, je oboustranně překrytý také technickou pryží o tloušťce 5 mm (pozice 7). Doraz stohu skla na rámu je obložen technickou pryží o tloušťce 10 mm (pozice 8).

Rám je pomocí čtyř šroubů M10x25 (pozice 15) a dvou středících čepů (pozice 18) připevněn k přírubě (pozice 2), do příruby je nasunuta středící trubka (pozice 3).

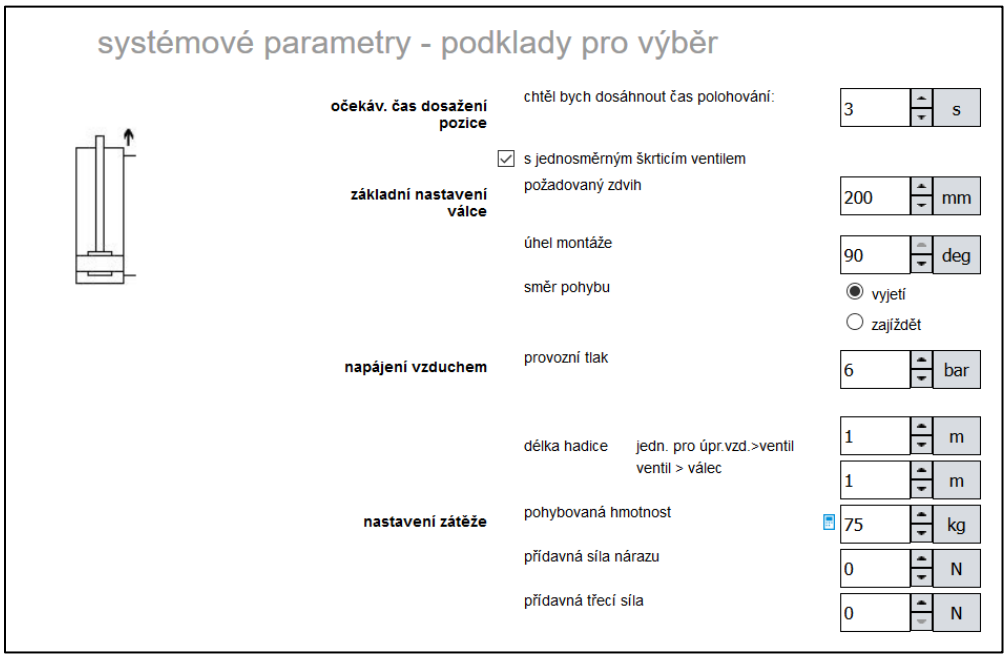
## 3.2 Konstrukční řešení zdvihacího zařízení

### 3.2.1 Volba prvků

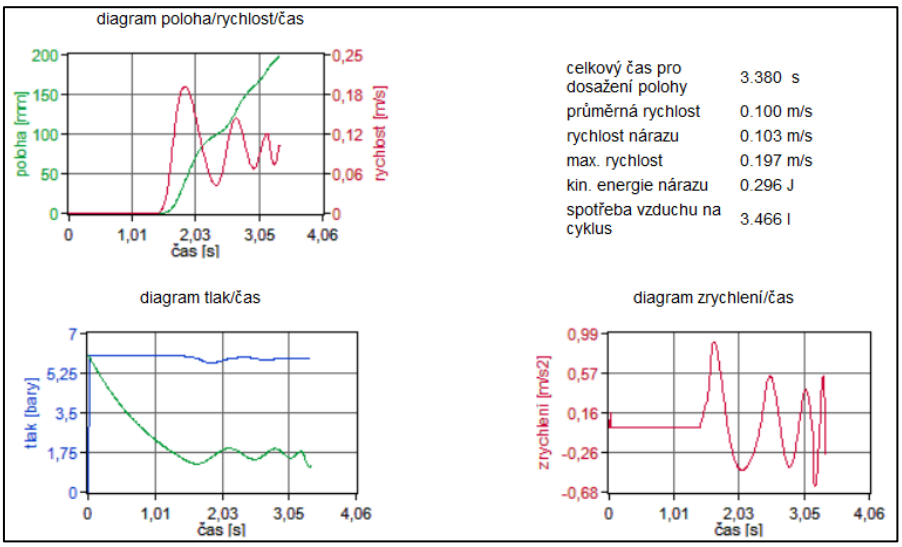
#### *3.2.1.1. Pneumatický válec*

Výběr pneumatického válce byl proveden na základě softwaru, který poskytuje firma Festo online a je dostupný z jejich webových stránek [7].

Na základě zadaných parametrů byl vybrán pneumatický válec DSCB 40  se zdvihem 200 mm.

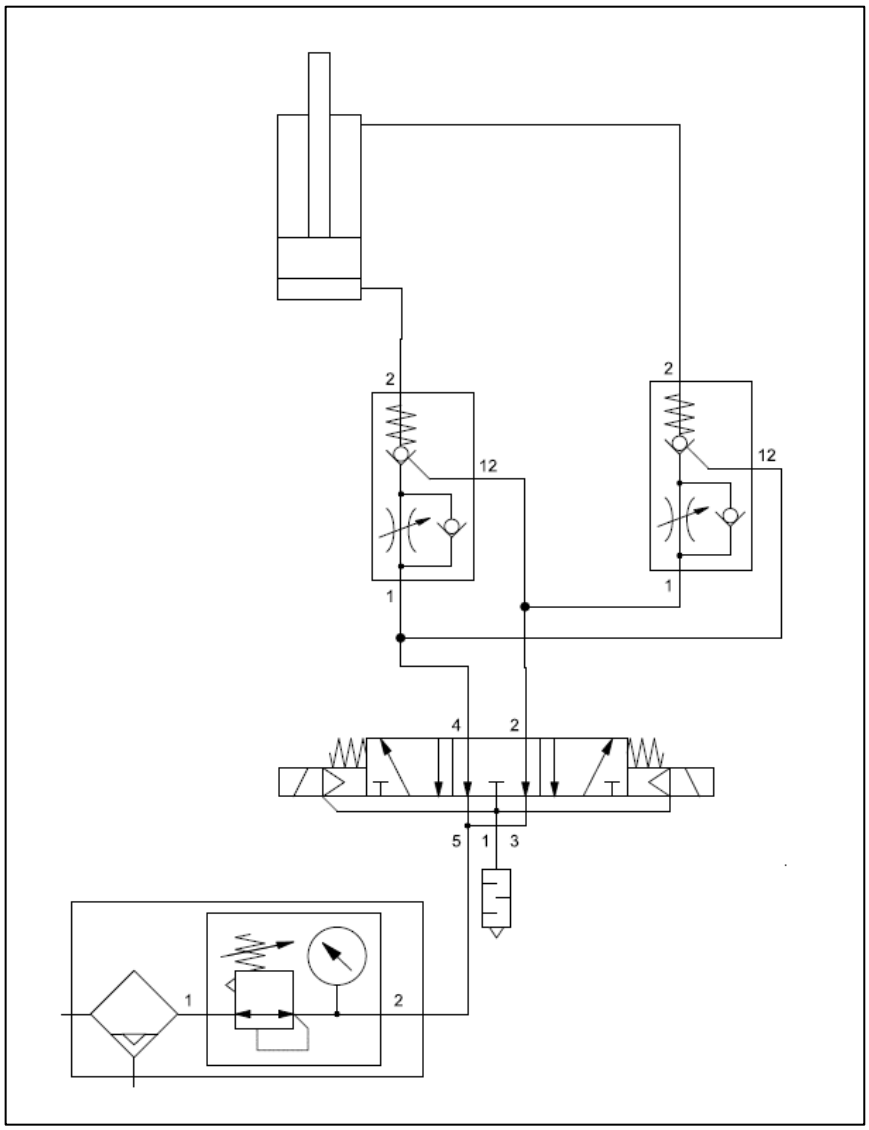



*Obr. 38 Zadané parametry do softwaru*




*Obr. 39 Výsledek simulace ze softwaru*

### 3.2.1.2 Pneumatické schéma zapojení




*Obr. 40 Schéma zapojení zdvihacího zařízení*

Ovládání pneumatického obvodu je zajištěno elektromagneticky ovládaným 5/3 ventilem, jehož střední poloha je odvzdušněná z důvodu, že byl použit škrtící zpětný ventil. Tento ventil umožnuje seřizovat rychlost pohybu a zajištuje plynulý pohyb. Zpětný ventil lze ovládat z druhé větve pneumatického obvodu a tím je zajištěn pneumatický válec proti samovolnému spuštění při případném poškození spojovacích hadic.

### 3.2.1.3 Vedení

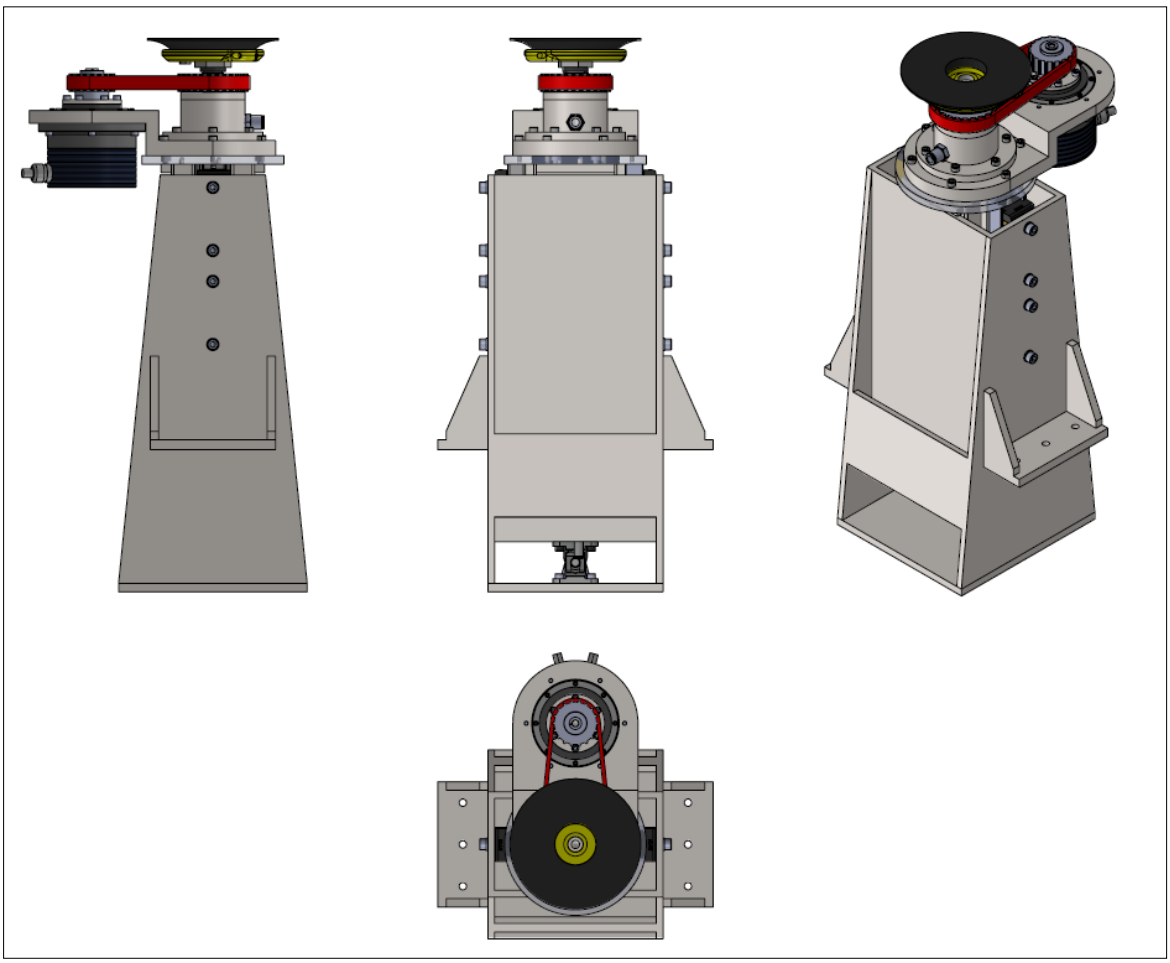
Pro plně vymezené vedení jeklového profilu ve svařovaném rámu je potřeba využít rozdělené vedení. Pro toto řešení je vhodné využít kompaktní řešení od renomované firmy – např. ROLLON. Při vhodné kombinaci tvaru lišt (na jedné straně U-lišta a na druhé straně K-lišta) je toto vedení schopno kompenzovat nerovnoběžnosti lišt až do hodnot 1 mm na 1m délky a natočení lišt až o 2°. Toto provedení přesahuje běžné tolerance a díky tomu poskytuje efektivní kompenzační systém a zároveň splňuje požadavky na levné provedení. [8]

#### *3.2.1.4 Servopohon*

Pro přesné pozicování stohů skla je potřeba do zdvihacího zařízeni instalovat rotační servopohon. Byl zvolen servopohon od firmy Harmonic Drive FHA 17 C. Tento servopohon je vybaven bezkartáčovým elektromotorem a inkrementálním odměřováním [9].

Díky servopohonu a převodu přes ozubený řemen je možné horní část zvedáku s přísavkou natáčet do přesné pozice vhodné pro stabilní uchopení.

### 3.2.2 Konstrukční provedení

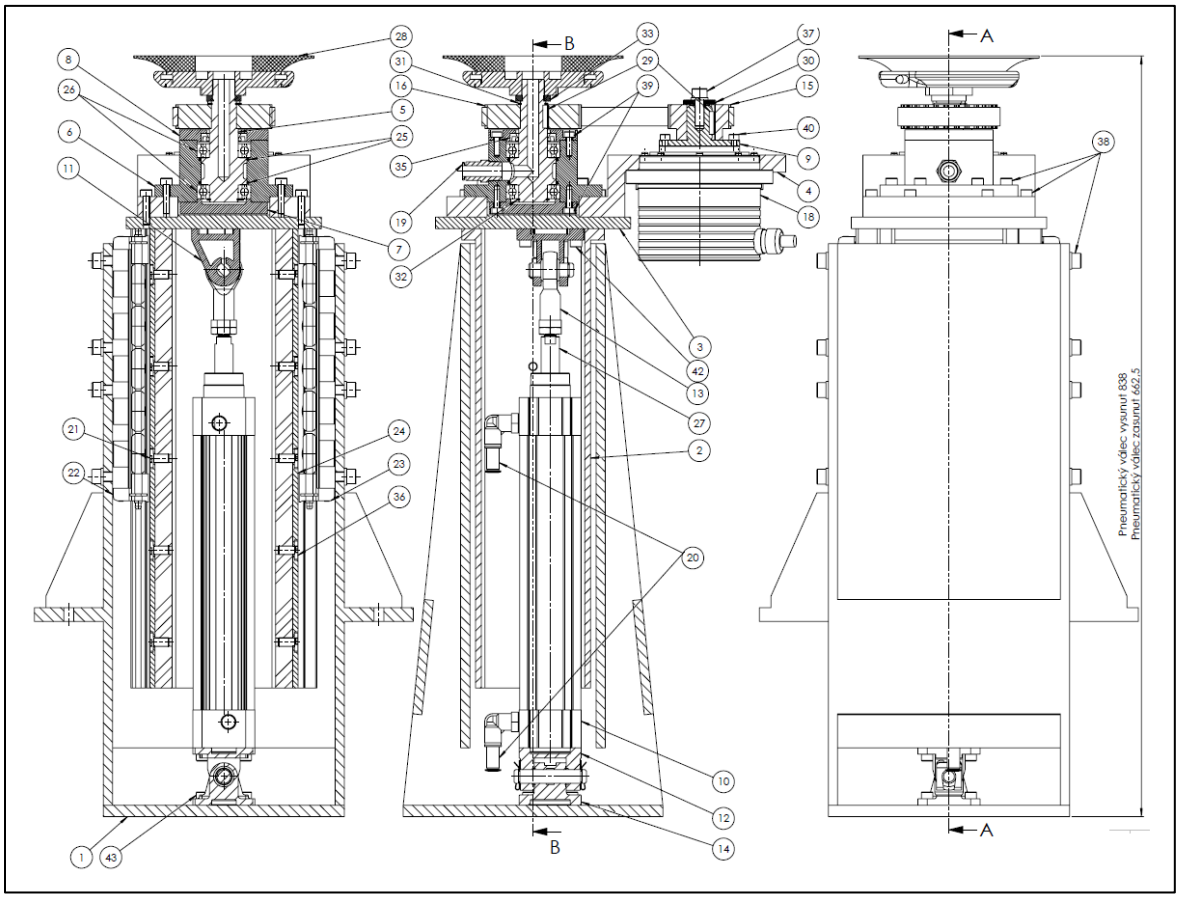


*Obr. 41 Konstrukční provedení zvedáku*

Konstrukce zvedáku je složena ze svařovaného rámu (pozice 1), uvnitř kterého je uložena noha (pozice 2), což je svařenec, jehož hlavní část je jekl 100x100x5. Pohyb nohy v rámu umožnuje kompaktní vedení od firmy Rollon složené ze dvou rozdílný lišt tvaru U a K a k nim odpovídajícím vozíkům (pozice 21 -24). K noze je přišroubována příruba – noha (pozice 3), ke které já následně přišroubována svařovaná mezipříruba (pozice 4), která díky svému tvaru umožnuje umístění servopohonu FHA 17 C (pozice 18) na jedné straně a na druhé straně rotační přívod (pozice 5). Rotační přívod je uložen v tělese rotačního přívodu (pozice 6), seshora uzavřen horním víkem (pozice 8) a zespodu spodním víkem (pozice 7). Na rotačním přívodu je pomocí pera uložena řemenice AT10 (n = 27) (pozice 16), řemenice je pomocí řemenu AT10 délky 775 mm (pozice 17), propojena s malou řemenicí AT10 (n = 18) (pozice 15), která je pomocí pera uložena na přírubě –

hřídel (pozice 9) a spojena se servopohonem. Na rotačním přívodu je ještě přišroubovaná přísavka F150 od firmy Piab (pozice 28).

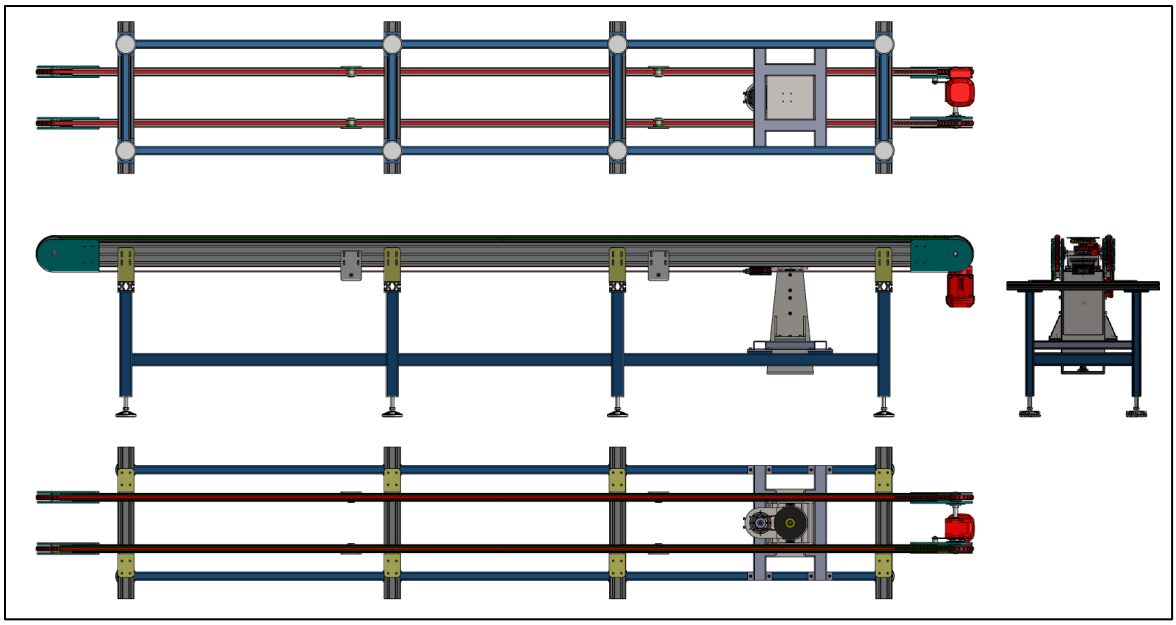
Pneumatický válec DSCB 40 se zdvihem 200 mm a vnějším závitem na pístní tyči (pozice 10) je umístěn ve svařované noze. Pneumatický válec je spojen s rámem pomocí kyvné příruby (pozice 12,14) na jedné straně a na druhé straně je pomocí ložiskového tělesa (pozice 11) a kloubové hlavice (pozice 13) připojena k přírubě.



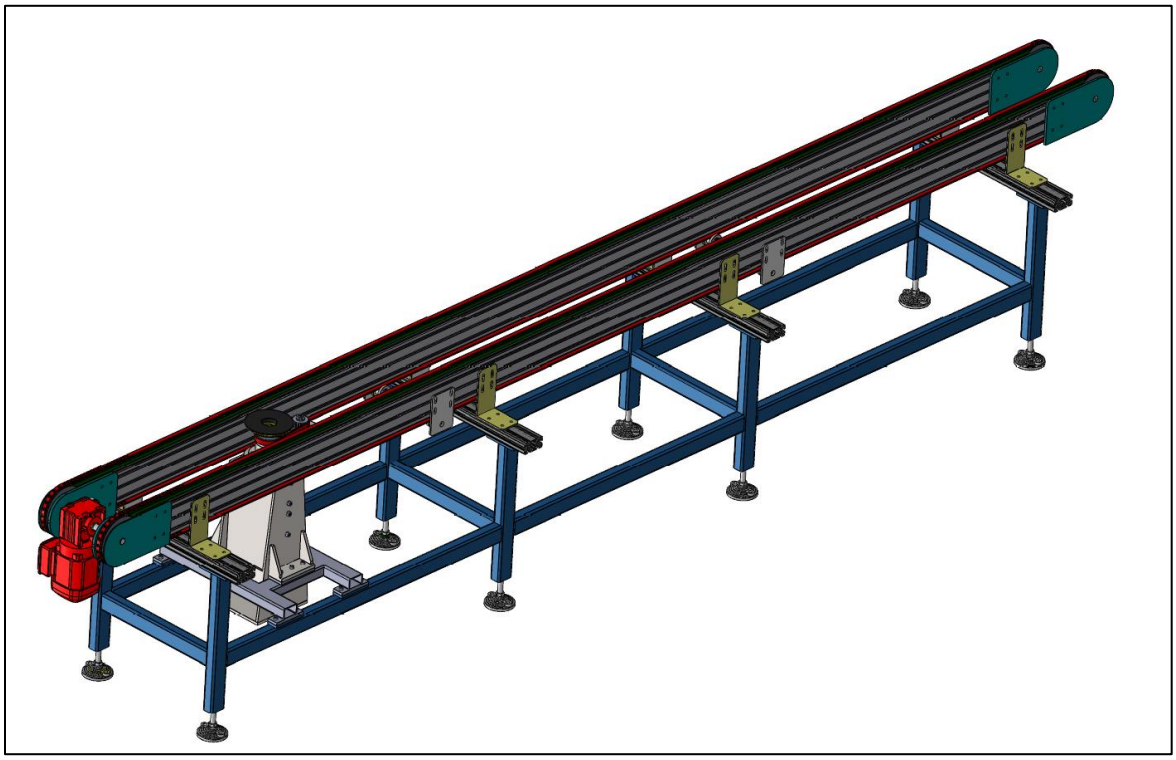

*Obr. 42 Výkres sestavy*

### 3.2.3 Umístění zvedáku do dopravníku

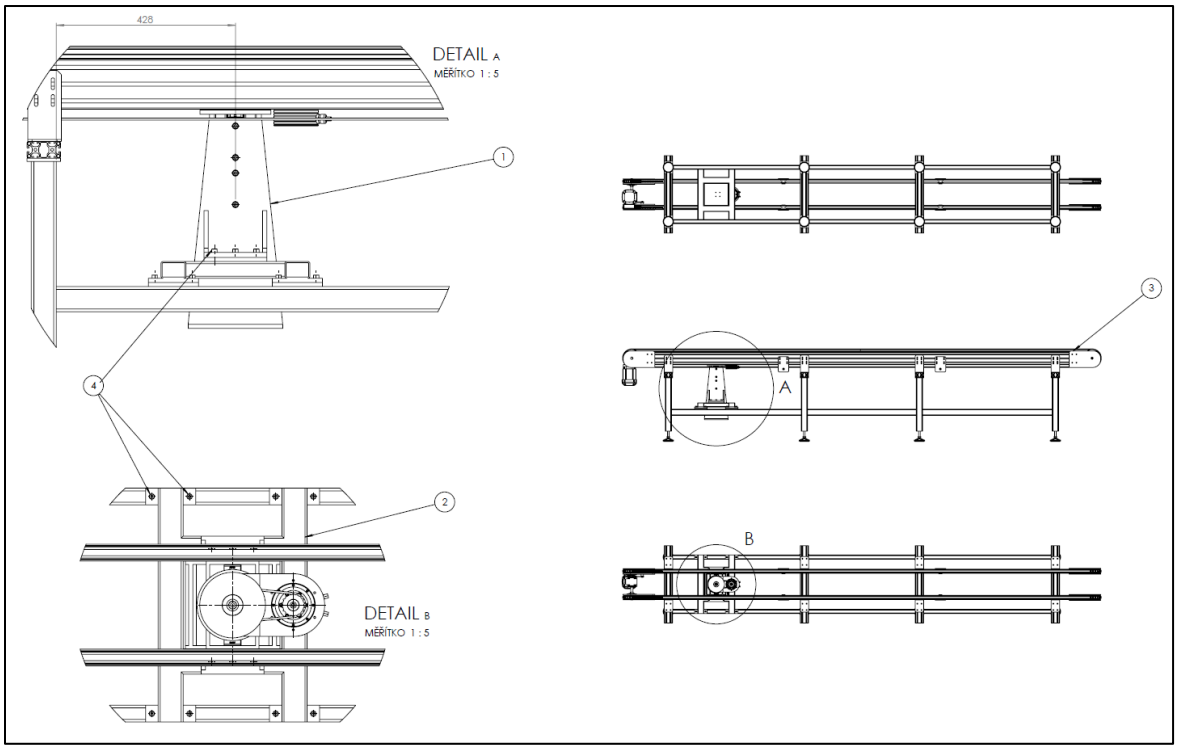
Pro umístění zvedáku do dopravníku byl navrhnut svařovaný rám z jeklového profilu 60x40x3 (pozice 2) a čtyř patek s vyvrtanými dírami pro šrouby. Konstrukční úprava dopravníku byla provedena přivařením dalších patek k rámu dopravníku, do kterých byly následně vyvrtány závitové díry pro spojení s rámem.



*Obr. 43 Umístění zvedáku do dopravníku*



*Obr. 44  3D pohled umístění zvedáku do dopravníku*




*Obr. 45 Výkres sestavy*

# 4. Technickoekonomické zhodnocení

Zhodnocení přínosu automatizace a navrhnutých periferií bylo provedeno z hlediska technologického a z hlediska ekonomického.

## 4.1 Technické zhodnocení

Předkládané řešení automatizovaného pracoviště bylo provedeno s cílem plně automatizovat proces paletizace bočních autoskel.

Hlavní problém automatizace této úlohy spočívá v chování stohu skla proloženého archy papíru. Toto chování je podmíněno frikčními parametry mezi sklem a papírem, sklem a úchopným prvkem. Ve stohu skel není zajištěno tření mezi jednotlivými skly a v nepříznivých případech může dojít k posunu jednotlivých skel a tím k vzniku nepřesností.

Velká výhoda navrženého úchopného chapadla spočívá ve velkém rozsahu, který je 15 – 95 mm. S ohledem na nutný rezervní prostor, který je potřeba nechat při uchopování volný na možné chyby vzniklé z různých hledisek, poskytuje navržené chapadlo rezervu pro možné nové výrobky jiné (i větší) tloušťky, než jaké se nyní vyrábí. Navržený pneumatický válec využitý v chapadle i zvolený průmyslový robot poskytují také dostatečnou rezervu pro možné nové výrobky s větší hmotností.

Variabilitu navrženého řešení pro případné budoucí změny výrobního programu je možné ještě zvýšit využitím pneumatického válce s větší silou při vysouvání pístnice, aby byla zajištěna možná rezerva pro větší nárůst hmotnosti vyráběných skel.

## 4.2 Ekonomické zhodnocení

Nejdůležitější přínos ekonomického zhodnocení spočívám v zjištění, jaká je rentabilita modifikace výrobní linky, a tedy zda se řešený proces automatizace vůbec vyplatí.

### 4.2.1 Odhad pořizovacích nákladů

Pořizovací náklady jsou tvořeny součtem jednotlivých konstrukčních uzlů:

| | | |
|---|---|---|
| Projektové náklady | 200 000 | Kč |
| Chapadlo | 240 000 | Kč |
| Zdvihací zařízení | 430 000 | Kč |
| Úprava dopravníku | 5 000 | Kč |
| Průmyslový robot | 1 100 000 | Kč |
| Rozvody (pneumatické, elektro) | 120 000 | Kč |
| Bezpečnost na lince | 100 000 | Kč |
| **Celkem** | **2 195 000** | **Kč** |

### 4.2.2 Doba návratnosti

V této části je proveden rozbor doby návratnosti v případě, že na každé části finální linky dojde k úspoře jednoho pracovníka. Průměrné roční náklady na jednoho pracovníka činní 21400 EUR/rok.

| | | |
|---|---|---|
| Mzda jednoho pracovníka | 21 400 | EUR |
| V případě kurzu 1 EUR = 26,54 Kč (5.6.2020) | 567 956 | Kč |

V případě trojsměnného provozu je potřeba započítat tři pracovníky (3 x 567 956Kč)

Automatizovaná linka bude nadále potřebovat obsluhu na zajištění narovnaných skel v paletě a jejich následný odvoz pomocí VZV. Tato obsluha, ale bude obsluhovat zároveň obě dvě části finální linky, takže náklady na tři pracovníky ve trojsměnném provozu je potřeba rozdělit na půl.

| | |
|---|---|
| Náklady na jednoho pracovníka obsluhy | 567 956 Kč |
| Celkové náklady na současnou obsluhu | 1 703 868 Kč |
| | |
| Náklady na obsluhu na jedné části linky | 851 934 Kč |
| Celkové uspořené náklady na obsluhu | 851 934 Kč |

| | |
|---|---|
| Uspořené náklady = mzdové náklady roční (UN) | 851 934 Kč |
| Jednorázové náklady = pořizovací náklady (JN) | 2 095 000 Kč |

Doba návratnosti

$$t_N = \frac{JN}{UN} = \frac{2\,095\,000}{851\,934} = 2{,}46\ roku$$

Výpočtem podílu jednorázových pořizovacích nákladů a uspořených ročních mzdových nákladů na jednoho pracovníka v třísměnném provozu dojde k návratnosti za 2,46 roku, tento výpočet není úplně přesný, protože do výpočtu není započítána žádná částka za údržbu a náklady na rozběh linky, takže reálná doba návratnosti bude o něco vyšší.

# Závěr

Úvodní část práce přinesla podrobnou analýzu výrobního procesu na celé výrobní lince CD 71 v závodu AGC Automotive Czech.

Dále v této části byli představeni typoví zástupci skel vyráběných na řešené výrobní lince a paletizačních řešení na dané lince, tedy faktorů, které nejvíce ovlivnily požadavky na automatizaci.

V druhé části bylo představeno několik možných variant uspořádání layoutu vykládky linky a následně bylo kriteriální analýzou rozhodnuto a vybráno nejvhodnější řešení. V této části také byl proveden koncepční návrh několika variant chapadla, ze kterých byl také pomocí další kriteriální analýzy vybrán nejvhodnější návrh.

Třetí část práce představila dvě části konstrukčního návrhu. První část se zabývala podrobným návrhem chapadla, v této části byl proveden výpočet manipulační úlohy, podle kterého byl následně zvolen požadovaný pneumatický válec, který je schopný vyvinout dostatečnou uchopovací sílu. Následně byl proveden pevnostní výpočet nejvíce namáhaných dílů chapadla. Druhá část konstrukčního řešení přinesla návrh zdvihacího zařízení a jeho zabudování do dopravníku s co nejmenší nutnou úpravou stávajícího řešení.

Poslední část řeší technickoekonomické zhodnocení přínosu automatizace finální části linky. Z ekonomického zhodnocení vyplynulo, že návratnost linky je 2,46 roku, což je poměrně krátká doba a z ekonomického hlediska se tedy řešená automatizace výrobní linky CD 71 vyplatí.

# Seznam použité literatury


[1] ABB IRB 6640. *ABB Group - Leading digital technologies for industry* [online]. Copyright © Copyright 2020 ABB [cit. 09.06.2020]. Dostupné z: https://new.abb.com/products/3HAC020536-012/irb-6640

[2] Object moved. *403 - Forbidden: Access is denied.* [online]. Dostupné z: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0001EN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch

[3] Novotný F., Horák, M., *Efektory průmyslových robotů*, skripta TU, Liberec, TUL, 2015, str 45. – str 50.

[4] Hesse, S., Greiferanwendungen, Blue Digest on Automation, Festo AG&Co., Eslingen 1997, str 115.

[5] Novotný F., Klebsa V., *Sborník konference sklářských strojů VIII. TUL Liberec 2006, Měření frikčního koeficientu skla a konstrukčních materiálů*, str 86. – str 94.

[6] *FRANE – Automação Ltda* [online]. Dostupné z: https://www.frane.com.br/product/adn-125-80-apa/ )

[7] *Válce podle norem DSBC | Festo Czech Republic*. [online]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/products_DSBC

[8] Novotný F., Horák M., *Konstrukce robotů*, TU v Liberci, Liberec 2015, 236 s.

[9] *301 Moved Permanently* [online]. Copyright © [cit. 09.06.2020]. Dostupné z: https://harmonicdrive.de/fileadmin/user_upload/2014_09_1018853_Engineering_Data_FHA_C.pdf

# Seznam příloh

Příloha č. 1 – Výkresová dokumentace finální části linky CD 71

Příloha č. 2 – Výkresová dokumentace chapadla

Příloha č. 3 – Výkresová dokumentace zdvihacího zařízení

Příloha č. 4 – Výkresová dokumentace konstrukční úpravy dopravníku