TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Zařízení pro odstředivé zalévání dutých vláken v membránových modulech

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Ondřej Friedrich**
Vedoucí práce: Ing. Šimon Kovář, Ph.D.

Liberec 2019

Tato stránka je prázdná

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Zadání bakalářské práce

Zařízení pro odstředivé zalévání dutých vláken v membránových modulech

Jméno a příjmení: **Ondřej Friedrich**
Osobní číslo: S16000648
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra textilních a jednoúčelových strojů
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s výrobou dutých membránových vláken
2. Seznamte se s problematikou zalévání membránových dutých vláken do koncovek membránových modulů
3. Navrhněte konstrukci pro odstředivé zalévání dutých vláken pomocí epoxidových pryskyřic do koncovek membránových modulů
4. Pro danou konstrukci vypracujte výkresovou dokumentaci

Rozsah grafických prací:	Vykresova dokumentace
Rozsah pracovní zprávy:	30
Forma zpracování práce:	tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

[1] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled. Díl 1 / Vyd. 2.* Liberec: Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7083-584-2

[2] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled. Díl 2 / Vyd. 2.* Liberec: Technická univerzita, 2005. ISBN 80-7083-608-3

[3] N.Li, N., G. Fane, W. S. Winston Ho, T. Matsuura. *Advanced Membrane Technology and Application.* Wiley, 2008. ISBN: 978-0-471-73167-2

[4] RIDER, Michael. *Designing with Creo Parametric 3.0.* SDCpublication. 2015. ISBN 9781585039807

Vedoucí práce:	Ing. Šimon Kovář, Ph.D. Katedra textilních a jednoúčelových strojů
Datum zadání práce:	30. října 2018
Předpokládaný termín odevzdání:	27. června 2019

Technická univerzita v Liberci
L.S.
-8-

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci 30. října 2018

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, 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 (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

22. 6. 2019

Ondřej Friedrich

Tato stránka je prázdná

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především Ing. Šimonu Kovářovi, Ph.D. za cenné rady při konzultacích a vedení během mé bakalářské práce a pánům Ing. Michalu Amrichovi, Ing. Robertu Válkovi, Ph.D a Ing. Davidu Malému z firmy MemBrain za vstřícný přístup.

Tato stránka je prázdná

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem konstrukce jednoúčelového zařízení pro odstředivé zalévání dutých membránových vláken do koncovek filtračních modulů. Modul rotuje kolem své příčné osy a pryskyřice pro zalití a utěsnění vláken je v koncových částech modulu udržována odstředivou silou. Délka zalévaných modulů je v rozpětí 300 - 1200 mm, vnější průměr modulů 20 - 110 mm.

Byly navrženy dva koncepty konstrukčního řešení s různou orientací osy rotace modulu. Pokud modul rotuje podle vertikálně orientované osy, jsou otáčky potřebné k udržení pryskyřice v koncových částech modulu vyšší, než když je osa rotace horizontální. Protože je zařízení konstruováno pro dlouhé moduly (až 1200 mm), přístup do zařízení se v závislosti na orientaci osy rotace také liší. Je-li horizontální osa rotace, modul rotuje ve svislé rovině a obsluha k němu má pro upnutí snadný přístup. U vertikální osy rotace rotuje modul v horizontální rovině a přístup k upínání je přes okraj rámu pro obsluhu značně složitější. Také zastavěná podlahová plocha je u vertikální osy rotace vyšší.

Doprava pryskyřice do koncových částí je u modulů do délky 500 mm řešena nádobkou připevněnou u konce modulu s krátkou hadičkou, kterou přeteče pryskyřice z nádobky do modulu. U modulů delších než 500 mm je pryskyřice dopravována ze statického zásobníku hadičkou do nálevky rotující společně s modulem a odtud opět hadičkou do konců modulu.

Zařízení je navrženo podle konceptu s horizontální osou rotace a práce dále obsahuje popis konstrukce zařízení a jednotlivých dílů.

Klíčová slova

Jednoúčelové zařízení, filtrace, membránový modul, membrána, odstředivé zalévání

Abstract

This bachelor thesis deals with the design of a single-purpose device for centrifugal potting of hollow membrane fibers into the ends of membrane modules. The module rotates around its transverse axis and the resin for potting and sealing the fibers is hold in the ends of the module by centrifugal force. The length of the modules is from 300 to 1200 mm, the outside diameter is from 20 to 110 mm.

This thesis work with two concepts of design with different orientation of the axis of rotation. If the module rotates around vertically oriented axis, the speed necessary to hold the resin in the ends of the module is higher than when the axis of rotation is horizontal. The access in to the device also depends on the orientation of the rotation axis. If is the axis oriented horizontal, the module rotates in a vertical plane and the operator has easy access to clamp the module. If is the axis vertical oriented, the module rotates in a horizontal plane and the access to the clamping is much more complicated, because is limited by the frame of the device. The built-up floor area is higher for device with vertical axis of rotation.

Transport of the resin to the ends of the modules up to 500 mm length is solved by a container fixed at the end of module with a short tube that the resin flows from the container into the module. For modules longer than 500 mm, the resin is transported from the static container through a tubing to a funnel rotating along with the module. From there through the tubing to the ends of module.

The device is designed according to the concept with a horizontal axis of rotation. The work also describes the construction of device and individual parts.

Key words

Single-purpose device, filtration, membrane module, hollow fibres membrane, centrifugal potting

Obsah

Seznam použitých symbolů 13

Úvod 17

1. Membránové moduly 18

1.1 Typy membránových modulů 18

1.2 Výroba vláken 19

1.3 Konstrukce modulů 20

1.4 Výroba modulu 20

1.5 Zalévání konců vláken 21

2. Cíle práce 23

3. Srovnatelná zařízení 24

4. Návrh zařízení 25

4.1 První koncept - zařízení s vertikální osou rotace 25

4.1.1 Stanovení otáček 25

4.1.2 Proporce a zástavbový prostor 27

4.2 Druhý koncept – zařízení s horizontální osou rotace 28

4.2.1 Stanovení otáček 29

4.2.2 Proporce a zástavbový prostor 30

4.3 Srovnání 31

5. Konstrukce zařízení 32

5.1 Upnutí modulu 32

5.1.1 Koncept upínání 32

5.1.2 Nosný profil 33

5.1.3 Popis konstrukce 36

5.2 Nálevka a vedení pryskyřice 37

5.2.1 Stanovení pracovních otáček stroje 38

5.2.2 Konstrukce nálevek 40

5.2.3 Škrtící ventil 42

5.3 Hřídel 42

5.3.1 Namáhání hřídele 42
5.3.2 Konstrukce 45
5.3.3 Pohonná jednotka 46
5.4 Skříň 46
6. Popis pracovního cyklu zařízení 49
6.1 Přípravná fáze 49
6.2 Strojní fáze 49
6.3 Dokončovací fáze 49
7. Základní parametry zařízení 50
8. Pokyny pro elektrifikaci zařízení 51
8.1 Řízení otáček stroje 51
8.2 Zabezpečení a obsluha zařízení 52
Závěr 53
Seznam použité literatury 54
Seznam obrázků 55
Seznam tabulek 56
Seznam příloh 57

Seznam použitých symbolů

$A\ [m]$	rozdíl v tloušťce pryskyřice
$a\ [m \cdot s^{-2}]$	odstředivé zrychlení
$a_s\ [m \cdot s^{-2}]$	výsledné zrychlení (součet tíhového a odstředivého zrychlení)
$a_t\ [m \cdot s^{-2}]$	tečné zrychlení
$d\ [m]$	průměr hřídele
$d_R = 0{,}122\ [m]$	roztečný průměr řemenice
$d_s = 0{,}008\ [m]$	průměr pohybového šroubu v pájeném spoji
$D_{hi}[m]$	vnitřní průměr modulu
$e\ [m]$	excentricita těžiště modulu
$F_1\ [N]$	síla kterou působí za rotace modul na konzolu (součet počátečního předpětí, odstředivé síly víčka a odstředivé síly pryskyřice)
$F_o\ [N]$	odstředivá síla
$F_p = 80\ [N]$	síla předpětí
$F_R\ [N]$	síla v řemeni
$F_s\ [N]$	síla v pohybovém šroubu
$g \cong 9{,}81\ [m \cdot s^{-2}]$	tíhové zrychlení
$G\ [N]$	tíhová síla
$h_s = 0{,}075\ [m]$	osová vzdálenost modulu a pohybového šroubu
$i\ [1]$	převodový poměr
$J\ [kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti
$k\ [m]$	výška hladiny v ose rotace
$l_s = 0{,}03\ [m]$	délka pájeného spoje
$L_h\ [m]$	délka modulu
$m_h\ [kg]$	celková hmotnost modulu
$m_p\ [kg]$	hmotnost pryskyřice

$m_v = 0{,}13\ [kg]$	hmotnost víčka
$M_D\ [Nm]$	dynamický rozběhový moment
$M_k\ [Nm]$	zkrutný moment
$M_o\ [Nm]$	ohybový moment
$n\ [ot \cdot min^{-1}]$	otáčky
$n_u\ [ot \cdot min^{-1}]$	udržovací otáčky
$n_z\ [ot \cdot min^{-1}]$	zalévací otáčky
$r\ [m]$	poloměr
$R1\ [N]$	reakce v ložisku
$R2\ [N]$	reakce v ložisku
$R_e\ [Pa]$	mez kluzu v tahu
$S = 1{,}96 \cdot 10^{-5}\ [m^2]$	průřez kolíku
$t_R\ [s]$	doba rozběhu
$t_u\ [s]$	doba provozu na udržovací otáčky
$t_z\ [s]$	doba provozu na zalévací otáčky
$T\ [N]$	smyková síla
$u\ [m]$	výška zalití modulu
$W_o\ [m^{-3}]$	modul průřezu v ohybu
$X\ [m \cdot s^{-2}]$	pulzace zrychlení
$z\ [m]$	výška hladiny
$\alpha\ [°]$	úhel sklonu pryskyřice
$\varepsilon\ [rad \cdot s^{-2}]$	úhlové zrychlení
$\rho_p\ [kg \cdot m^{-3}]$	hustota pryskyřice
$\sigma_t\ [Pa]$	tahové napětí
$\tau\ [MPa]$	smykové napětí

τ_{kl} $[Pa]$	mez kluzu ve smyku
φ [°]	úhel natočení modulu
ω $[rad \cdot s^{-1}]$	úhlová rychlost
ω_z $[rad \cdot s^{-1}]$	zalévací otáčky

Tato stránka je prázdná

Úvod

Filtrační technologie mají široké uplatnění v průmyslu, nejen za účelem zisku některých složek směsi, ale ve velké míře také pro čištění a recyklaci používaných látek. Například pro čištění vody po průmyslovém využití, v potravinářství, recyklaci cenných látek ve výrobních procesech (například organických kyselin a kovů) nebo separaci plynů.

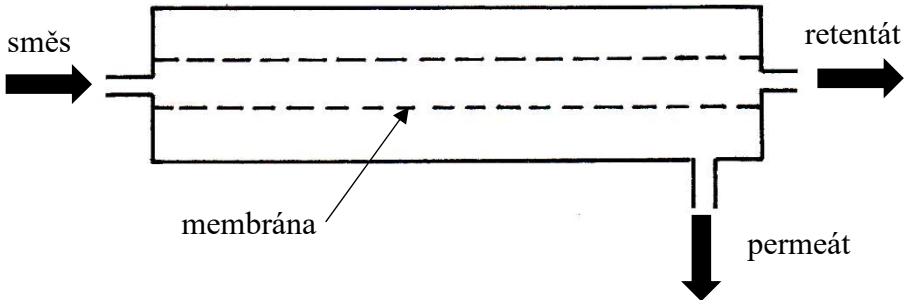
Tato práce se zabývá konstrukcí jednoúčelového stroje, který je určen pro výrobu kapilárních membránových modulů. Membrána, ve formě dutých vláken, je v těle modulu upevňována za rotace zalitím konců vhodnou epoxidovou nebo polyuretanovou pryskyřicí.

Práce byla zadána firmou MemBrain, která se zabývá výzkumem a inovací v oblasti membránových procesů. Zařízení je koncipováno jako laboratorní, firma MemBrain na něm bude vyrábět prototypy membránových modulů pro další testování a výzkum.

Výstupem práce je konstrukční návrh zařízení včetně kompletní výkresové dokumentace.

1. Membránové moduly

Membránové moduly jsou základní jednotkou filtračních zařízení. Obsahují membránu ve vhodném tvaru a formě s ohledem především na její co největší funkční plochu při co nejmenším objemu modulu. Na membráně, tedy speciální mechanické překážce, dochází k filtraci – dělení složek směsi na základě rozdílných odporů při prostupu touto překážkou. Směs se přivádí do modulu na vstupní stranu membrány. Z modulu se odvádí permeát a retentát (viz obr. 1.1). Permeát jsou složky, které působením např. tlakového nebo koncentračního spádu prostupují membránou. Zbytek směsi, který membránou neprostoupí, se nazývá retentát. Zvýšení velikosti toku permeátu a kvality dělení směsi se dociluje větším počtem modulů, které se řadí sériově, paralelně nebo kombinovaně.



Obrázek 1.1: Ilustrační obrázek – membránový modul

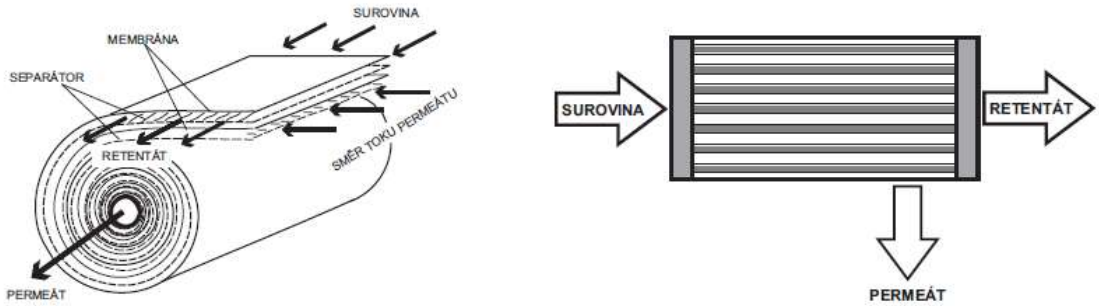
1.1 Typy membránových modulů

Podle vnitřního uspořádání modulu a tvaru membrány rozlišujeme přibližně pět základních konstrukcí modulů:

a. Trubkové
b. Kapilární
c. S dutými vlákny
d. Deskové
e. Vinuté

Směry proudění se v jednotlivých modulech mohou lišit v závislosti na jejich použití. Trubkový, kapilární a modul s dutými vlákny využívají membránu ve tvaru trubky (viz obr. 1.2.b). První dva se liší zejména počtem a průměrem membránových vláken – trubkový má malý počet vláken o velkém průměru (10 až 30 mm). Tekutina teče uvnitř membránových vláken a permeátový prostor je vně. Modul s dutými vlákny má permeátový prostor uvnitř vláken a tato konstrukce umožňuje použití vyšších přetlaků v retentátovém prostoru, protože přetlakem nedochází k „nafukování“ vláken a tím zvětšování pórů a snížení kvality filtrace. Deskový modul má za

sebou řazeny ploché membrány, mezi kterými proudí retentát kolmo na směr prostupu membránou. Vinutý modul (obr. 1.2.a) je blízký deskovému modulu, desky jsou ale stočeny do válce. Surovina proudí retentátovým prostorem rovnoběžně s osou válce a permeát odchází kolmo na směr proudění suroviny do prostoru s porézním materiálen a následně po spirále ke středu modulu.[2]



1.2.a 1.2.b

Obrázek 1.2: Ilustrační obrázek – 1.2.a: vinutý modul, 1.2.b: trubkový modul (Chemické inženýrství I, VŠCHT)

1.2 Výroba vláken

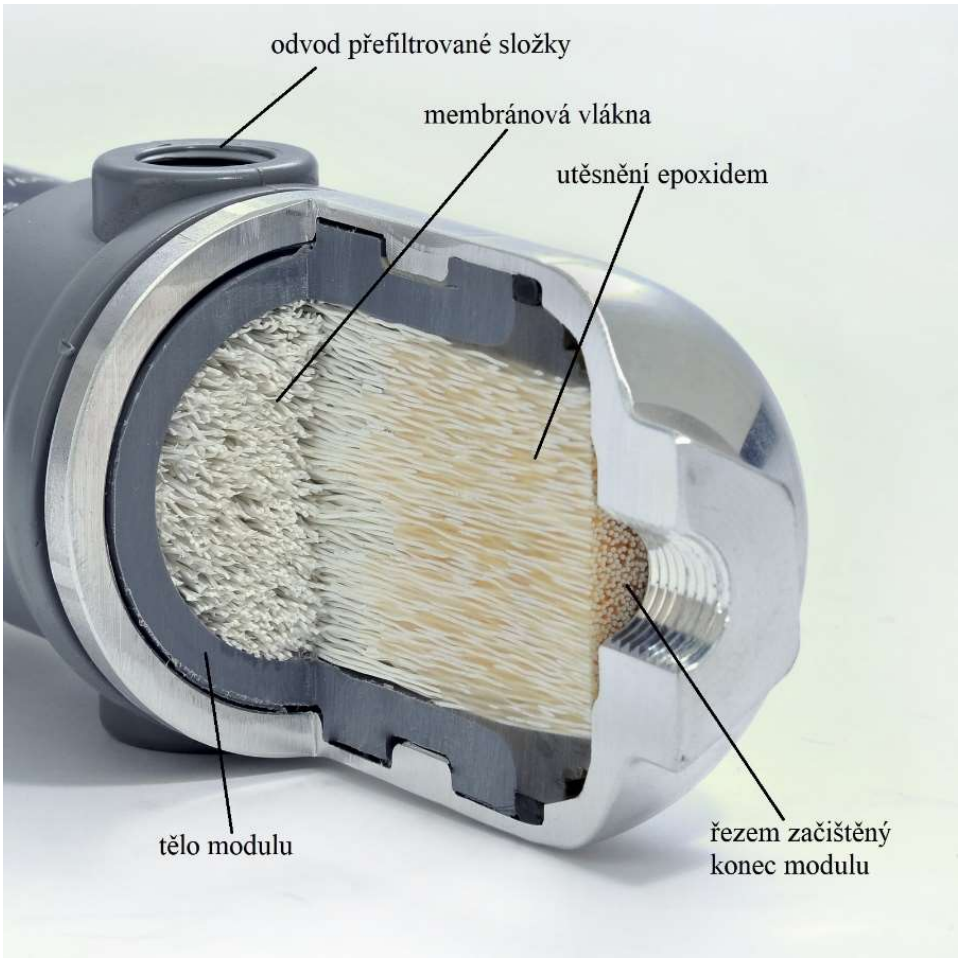
Membránová vlákna kapilárních modulů pro filtraci plynů jsou ve firmě MemBrain vyráběna metodou inverze fází na stroji Filatech. Roztok speciálního polymeru v rozpouštědle je vytlačován do srážecí nádrže, která obsahuje srážecí kapalinu, což je nejčastěji voda. Rozpouštědlo se mísí s vodou, polymer se v lázni sráží a vzniká tenké vlákno. Pro vznik dutého vlákna je současně s roztokem koaxiální tryskou přiváděna srážecí kapalina i do středu vlákna, která sráží vlákno zevnitř. Kontinuálně vznikající duté vlákno obsahuje uvnitř stále srážecí kapalinu s rozpouštědlem, následně se proto dělí na požadované délky a důkladně proplachuje.

Průměr vlákna a tloušťku stěny lze ovlivňovat rychlostí vytlačování a odebírání vlákna a regulací průtoku vnitřní srážecí tekutiny. Rozdílností vnitřní a vnější srážecí tekutiny lze dosáhnout asymetričnosti membrány. Průměry vláken dosahované touto metodou jsou stovky mikrometrů. Vlákna větších průměrů pro filtraci například tekutin jsou vyráběna extruzí polymeru přes koaxiální trysku do vodní lázně, obdobně jako plastové polotovary.

Vlákna lze následně chemicky upravit například s ohledem na potlačení plastifikace polymeru.[8]

1.3 Konstrukce modulů

Vnější plášť modulu je tvořen plastovou trubkou, která je vyplněna membránovými (vlákny). Ta musí být v koncích modulu upevněna tak, aby byla zajištěna dokonalá těsnost mezi vlákny a trubkou, a tím i ke spolehlivému oddělení permeátového a retentátového prostoru vlákny (viz obr. 1.3). Konce trubky jsou opatřeny šroubením pro připojení do obvodu filtrovaného média. Stěna trubky je u jednoho nebo obou konců opatřena otvorem se šroubením pro odvod permeátu. Směs je přiváděna na jeden konec modulu, proudí vlákny, přes jejichž stěnu odchází permeát, a retentát z modulu vystupuje druhým koncem.



Obrázek 1.3: Ilustrační obrázek, řez modulem (Forward Osmosis Tech, upraveno)

1.4 Výroba modulu

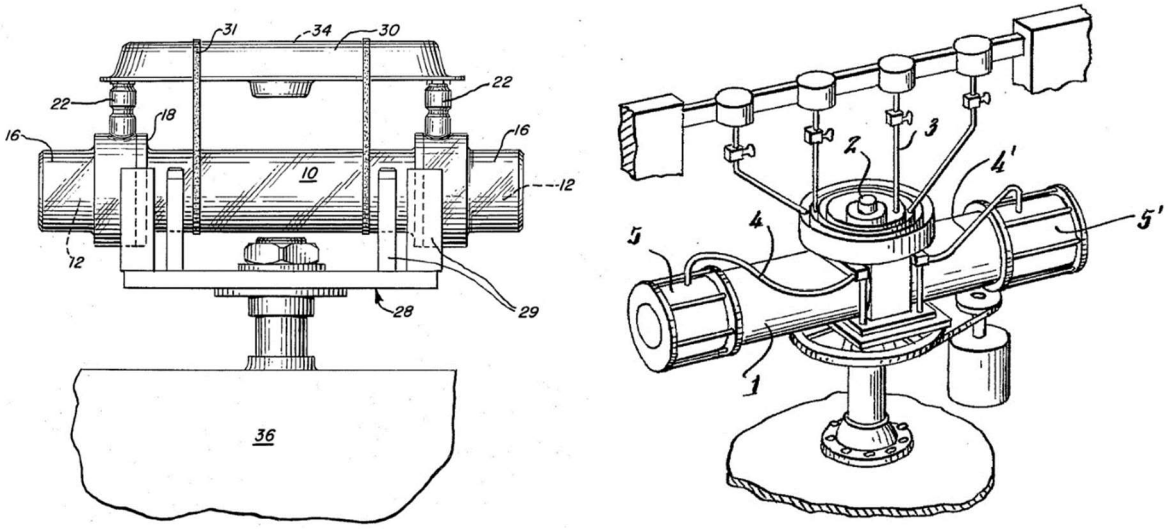
Základní požadavek při výrobě je dokonalé utěsnění membránových vláken v modulu. Tělo modulu je předem opatřeno otvory pro odvod permeátu. Následně jsou vložena vlákna, kterými je tělo v celém průřezu vyplněno a jejich konce zality například epoxidovou nebo polyuretanovou

pryskyřicí, která vlákna fixuje a uzavře dutiny mezi nimi. Po vytvrzení jsou konce modulu začištěny tak, aby byla vlákna průchozí – zpravidla odříznutím znečištěných konců modulu - a je doplněno šroubení pro připojení média. Dvě základní možnosti zalití jsou staticky a odstředivě.

1.5 Zalévání konců vláken

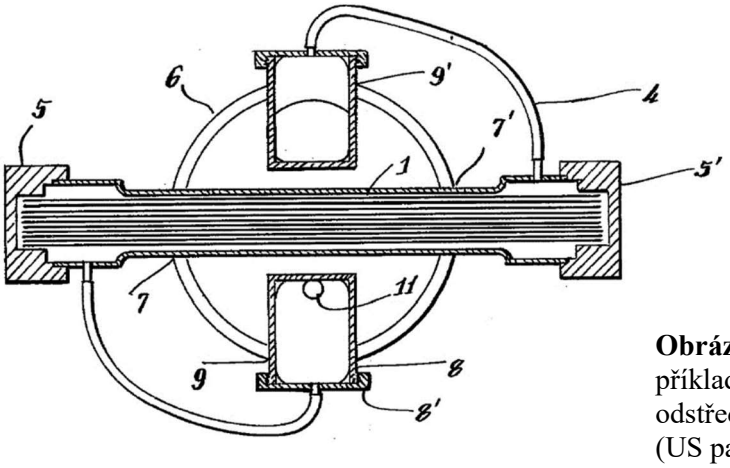
Při statickém zalévání stojí modul na své jedné podstavě a přes víčko je odspodu mezi vlákna plněn pryskyřicí. Po ztuhnutí pryskyřice je modul otočen a proces se opakuje pro druhý konec.

Princip odstředivého zalévání byl patentován v roce 1980 a umožňuje zalití obou konců současně s využitím působení odstředivého zrychlení (viz obr. 1.4).



1.4.a 1.4.b

Obrázek 1.4: Obrázky z patentu – odstředivé zalévání
(US patent 4227295 (1.4.a) a 4190411 (1.4.b), rok 1980)



Obrázek 1.5: Obrázek z patentu – příklad distribuce pryskyřice odstředivým zrychlením
(US patent 4190411, rok 1980)

Modul je roztočen kolem osy kolmé na podélnou osu modulu a procházející středem jeho délky. Odstředivé zrychlení na koncích modulu, dosažené vysokými otáčkami, udržuje pryskyřici na stěnách víček. Pryskyřice je do konců modulu dopravena vlivem odstředivého zrychlení například hadičkou z externí nádržky, která rotuje společně s modulem. Nádržka může být umístěna buď blízko osy rotace, nebo přímo u konců modulu (viz obr. 1.5).

Dalším způsobem je použití nálevky, do které pryskyřice volně stéká ze statické nádrže nebo centrálního rozvodu (viz 1.4.b). Z nálevky je opět odstředivým zrychlením vytlačována směrem ke koncům modulu.

2. Cíle práce

Cílem práce je ve spolupráci s firmou MemBrain navrhnout zařízení pro odstředivé zalévání dutých membránových vláken do koncovek modulů a vytvořit kompletní výkresovou dokumentaci. Bude se jednat o laboratorní zařízení pro výrobu prototypů membránových modulů. Elektrifikace zařízení a návrh řídícího programu již není náplní práce, pouze zde bude popsáno, s jakými funkcemi návrh konstrukce počítá.

Je požadován velký rozsah délek a průměrů modulů. Od délky 300 mm a vnějšího průměru 20 mm po délku 1 200 mm a vnější průměr 110 mm.

Pryskyřice, která bude použita pro zalévání, je na bázi epoxidu s názvem VERO MB-001 od výrobce Synpo, její katalogový list je součástí přílohy.

3. Srovnatelná zařízení

Komerčně prodávaných strojů využívajících odstředivé zalévání je velmi málo. Jedním z výrobců je například jihokorejská firma PHILOS Co. Ltd. (viz obr. 3.1).

Z dostupných informací k tomuto zařízení lze zjistit, že je vyráběno ve dvou velikostních verzích. Pro moduly o maximálním průměru 4 inch (101,6 mm) a délce 600 mm s otáčkami 100-500 ot/min nebo pro moduly o max. průměru 3 inch (76,2 mm) a délce 1 000 mm s otáčkami 100-350 ot/min. Pryskyřice je do konců dopravována hadičkou z dvojité nádržky blízko ose rotace. Komora stroje je vyhřívaná na teplotu okolo 40 - 60 °C a příkon zařízení je až 10 kW.

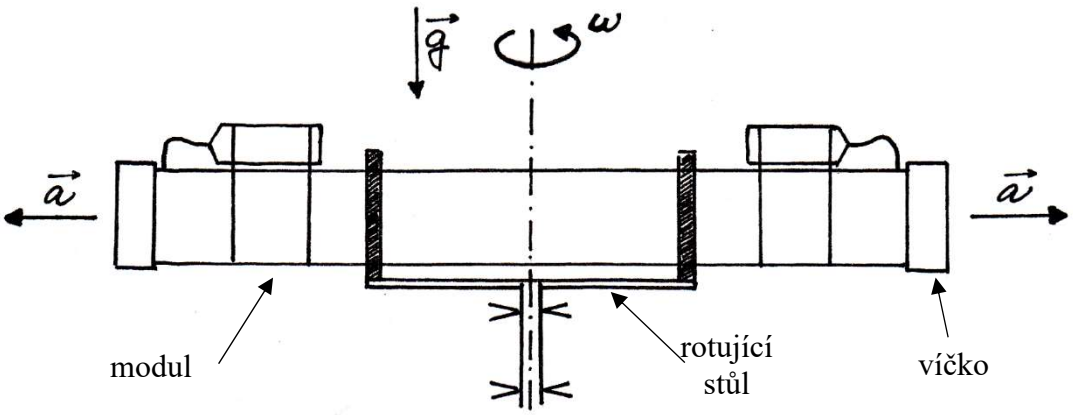
Obrázek 3.1: Module potting system, Philos (philosmembrane.com)

4. Návrh zařízení

V rámci rozvahy byly navrženy dva koncepty zařízení a v této kapitole jsou představeny jejich základní parametry a srovnání. Podle vybraného konceptu poté bylo zařízení navrženo.

4.1 První koncept - zařízení s vertikální osou rotace

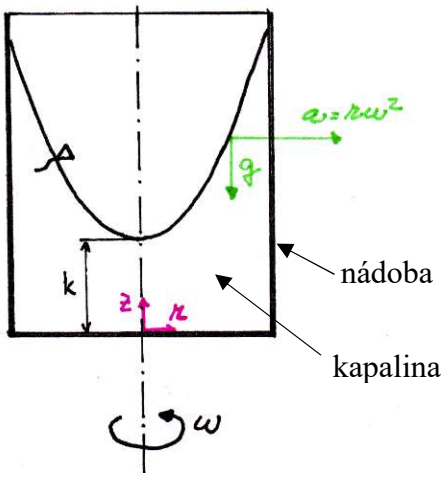
Koncept prvního návrhu zařízení (viz obr. 4.1) vychází především z funkčního jihokorejského stroje, který ale nemá možnost uchycení požadovaného spektra modulů, a dohledaných patentů. Osa rotace je umístěna vertikálně, na ní je na nosiči nebo otočném stole kolmo uchycen modul a pryskyřice je odstředivě hadičkami dopravována ze zásobních nádržek do konců modulu.



Obrázek 4.1: Koncept zařízení s horizontální osou rotace

4.1.1Stanovení otáček

Základním parametrem stroje jsou jeho pracovní otáčky. Konce modulu jsou provizorně zavíčkované a pryskyřice je v nich udržována odstředivou silou. Ta je závislá na poloměru rotace (tedy délce modulu) zalévané části a s rostoucí délkou modulu klesají otáčky nutné pro vytlačení pryskyřice a jejímu udržení na stěně víčka.

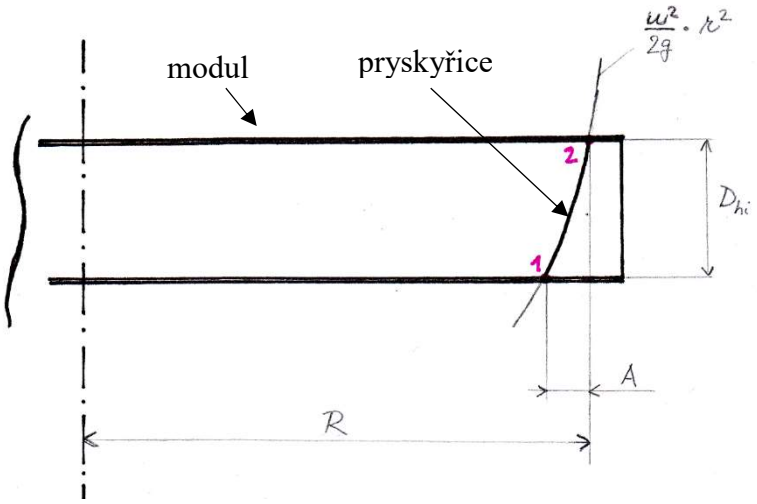


Obrázek 4.2: Ilustrační obrázek - kapalina v relativní rovnováze při rotaci kolem svislé osy

Jsou-li otáčky konstantní, pryskyřice se po dobu tuhnutí nachází v relativní rovnováze a její hladinová plocha v řezu má tvar paraboly, která se dá obecně popsat rovnicí [1]:

$$z = \frac{r^2 \cdot \omega^2}{2g} + k \tag{4.1}$$

Kde $\boldsymbol{z}$ je výška hladiny, $\boldsymbol{r}$ poloměr, $\boldsymbol{\omega}$ úhlová rychlost rotace, $\boldsymbol{g}$ tíhové zrychlení a $\boldsymbol{k}$ výška hladiny na ose rotace (viz obrázek 4.2). Konkrétní vztah se v tomto případě snáze odvodí z obrázku 4.3, kde je v řezu znázorněna hladinoplocha pryskyřice vytlačené na stěnu víčka.



Obrázek 4.3: Hladinoplocha pryskyřice v modulu při rotaci kolem vertikálně orientované osy

$$\left[\frac{\omega^2}{2g} \cdot R^2\right] - \left[\frac{\omega^2}{2g} \cdot (R - A)^2\right] = D_{hi} \tag{4.2}$$

Jinými slovy vzdálenost $\boldsymbol{D_{hi}}$ je rovna rozdílu funkčních hodnot v bodech **1** a **2**. $\boldsymbol{D_{hi}}$ je vnitřní průměr modulu a $\boldsymbol{A}$ je rozdíl v tloušťce pryskyřice. Úhel sklonu pryskyřice $\boldsymbol{\alpha}$ se dá při malých rozdílech $\boldsymbol{A}$ zjednodušeně vyjádřit jako:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{D_{hi}}{A}\right) \tag{4.3}$$

Po dosazení rovnice (4.3) do rovnice (4.2) lze vyjádřit otáčky závislé na třech parametrech – vnitřním průměru modulu, délce modulu a úhlu sklonu pryskyřice. (Je uvažováno pouze kladné řešení rovnice):

$$\omega = \tan(\alpha) \cdot \sqrt{\frac{2g}{2R \cdot \tan(\alpha) - D_{hi}}} \tag{4.4}$$

Pro zvolený úhel sklonu pryskyřice lze určit pro každý rozměr modulu jeho otáčky. V tabulce 4.1 jsou otáčky pro různé úhly sklonu a několik délek modulů vypočítány. V tabulce 4.2 jsou hodnoty rozdílu **A** pro jednotlivé sklony. Poloměr $\boldsymbol{R}$ musí být ve výpočtu uvažován menší než polovina délky modulu, protože minimální tloušťka pryskyřice by měla být v rozpětí 20 - 40 mm.

Tabulka 4.1: závislost předpokládaných otáček na úhlu sklonu pryskyřice ∝

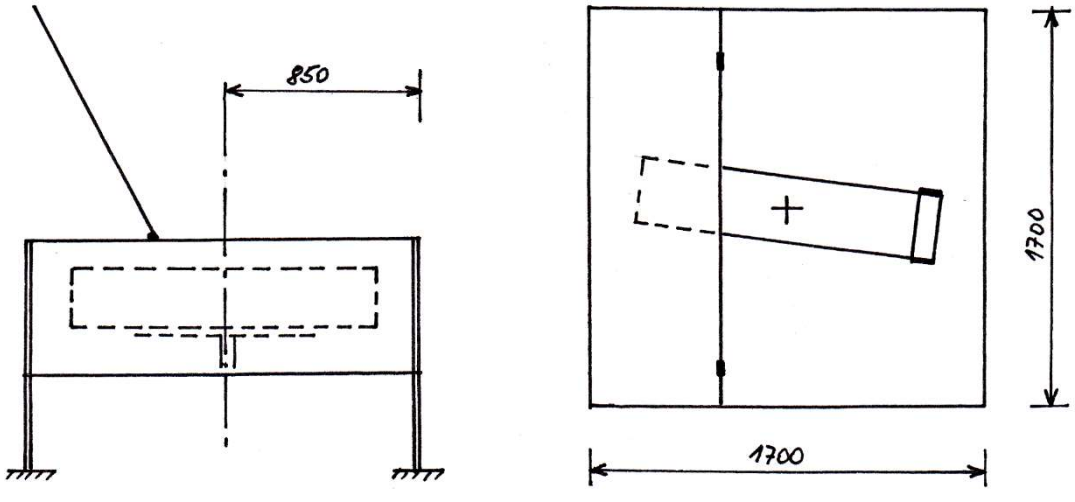
otáčky (1/min)					
délka modulu (mm)		300	600	900	1200
α	82°	234	152	122	108
	85°	295	192	154	137
	88°	460	300	245	218
	89°	650	427	345	307

Tabulka 4.2: velikost rozdílu **A** pro daný průměr modulu a úhel sklonu pryskyřice ∝

velikost rozdílu A (mm)							
průměr modulu (mm)		20	30	50	70	90	110
α	82°	3	4	7	10	13	15
	85°	2	3	4	6	8	10
	88°	1	1	2	2	3	4
	89°	0	1	1	1	2	2

4.1.2 Proporce a zástavbový prostor

Pro určení výsledných rozměrů stroje vyjdeme z požadavků na maximální délku modulu, což je 1 200 mm. S ohledem na manipulační prostor pro upnutí a bezpečnostní mezeru mezi modulem a rámem lze předpokládat pracovní prostor stroje kruh průměru okolo 1 700 mm, který určí půdorys rámu. Rám bude čtvercový o hraně 1 700 mm (viz obr. 4.4), případně osmiúhelník vepsaný do tohoto čtverce. Zastavěná podlahová plocha je čtverec o hraně 1,7 m. V případě vážné nehody zařízení může být vzhledem k vertikální ose rotace ohrožena celá místnost.



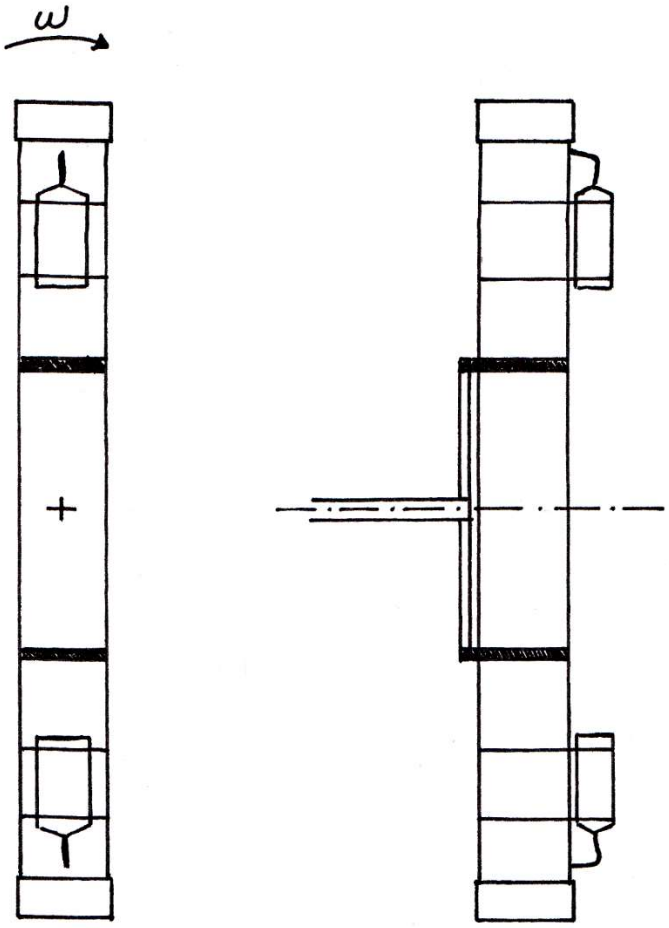
4.4.a 4.4.b

Obrázek 4.4: Bokorys (4.4.a) a půdorys (4.4.b) zařízení s vertikální osou rotace

Osa rotace bude od vnějšího okraje rámu vzdálena přibližně 850 mm. Při této vzdálenosti bude zakládání modulů pouze zvenku přes hranu rámu velmi nekomfortní až neproveditelné. Otevíratelný bude muset být i obvod rámu, aby byl umožněn vstup do stroje pro manipulaci při upínání modulu.

4.2 Druhý koncept – zařízení s horizontální osou rotace

Alternativním řešením problému je horizontální orientace osy rotace modulu (viz obr. 4.5). Dá se předpokládat pokles nutných provozních otáček stroje, protože gravitační zrychlení způsobí pouze pulzaci odstředivého zrychlení a od určitých minimálních otáček nebude mít na tečení pryskyřice vliv. Nebyly ale nalezeny žádné informace o tom, že by tento způsob řešení byl někým použit.



Obrázek 4.5: Koncept zařízení s horizontální osou rotace

4.2.1 Stanovení otáček

Rotace modulu kolem horizontální osy je výhodná především díky výraznému snížení pracovních otáček stroje. Pro udržení pryskyřice v koncích modulu stačí, aby bylo odstředivé zrychlení v kterémkoli okamžiku větší než tíhové a nemohlo dojít k jejímu stečení. Toho je s výhodou využito a pracovní cyklus stroje je rozdělen na dvě části. Na část zalévací, kdy jsou otáčky dány potřebným odstředivým zrychlením pro zatečení pryskyřice, a na část udržovací, kdy dochází k tuhnutí a odstředivé zrychlení musí být pouze větší než gravitační. Očekávaná doba zalévání je v řádu minut a očekávaná doba tuhnutí jsou řádově desítky minut, při kterých může modul rotovat minimálními otáčkami. Odstředivé zrychlení je dáno vztahem:

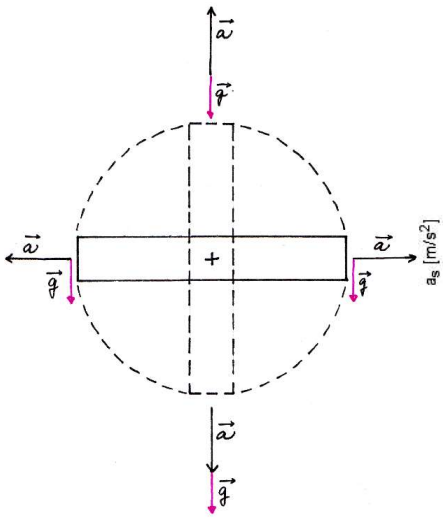
$$a = r\omega^2, \tag{4.5}$$

kde $\boldsymbol{a}$ je odstředivé zrychlení ve zkoumaném bodě, a $\boldsymbol{r}$ poloměr rotace daného bodu. Při stanovení minimálního odstředivého zrychlení na $\boldsymbol{a = 1,5 \cdot g}$ jsou udržovací otáčky stroje mezi $\boldsymbol{50\ ot \cdot min^{-1}}$ pro nejdelší modul a $\boldsymbol{95\ ot \cdot min^{-1}}$ pro nejkratší modul, bez ohledu na průměr modulu.

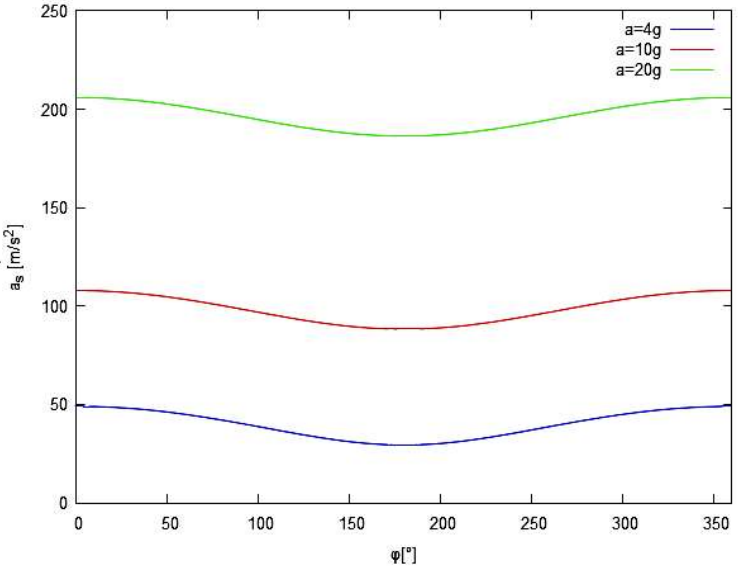
Výsledné zrychlení, které působí na pryskyřici, je součet tíhového a odstředivého zrychlení (viz obr. 4.6). Je pulzující, dáno vztahem

$$a_s = \sqrt{[g + a \cdot \cos(\varphi)]^2 + [a \cdot \sin(\varphi)]^2}\,, \tag{4.6}$$

kde $\boldsymbol{a_s}$ je výsledné zrychlení a $\boldsymbol{\varphi}$ natočení modulu. Rozkmit je $\pm\, \boldsymbol{g}$, nejnižší zrychlení působí v horní úvrati a jeho velikost je $\boldsymbol{a - g}$ a nejvyšší zrychlení o velikosti $\boldsymbol{a + g}$ působí v dolní úvrati (viz obr. 4.7).



Obrázek 4.6: Vektory působících zrychlení v průběhu otáčky



Obrázek 4.7: pulzace výsledného zrychlení v průběhu otáčky

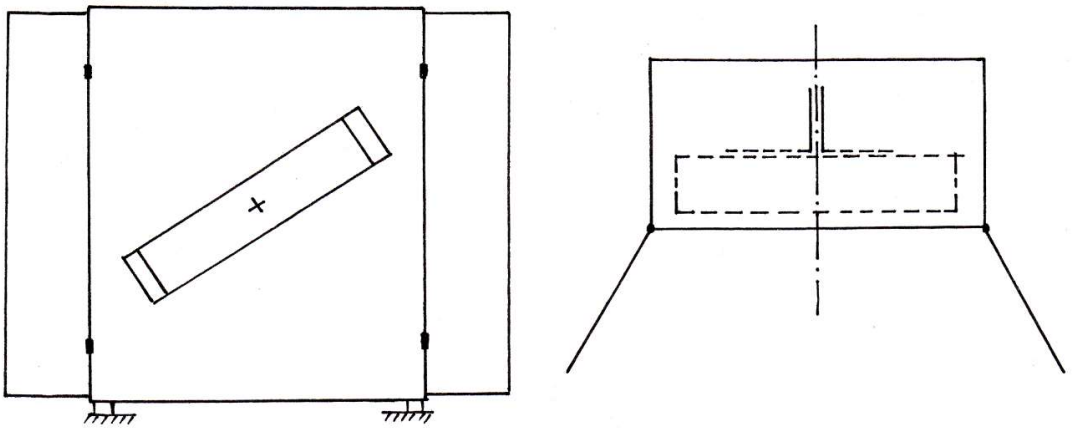
Pro představu o možných maximálních otáčkách byly v tabulce 4.3 spočítány otáčky v závislosti na délce modulu a odstředivém zrychlení, které je uvedeno jako násobky tíhového zrychlení $\boldsymbol{g}$. Doplňující informací je velikost pulzace zrychlení uvedená jako velikost amplitudy v procentech vzhledem k odstředivému zrychlení. Z tabulky 4.3 je zřejmé, že otáčky se pohybují zhruba na 50 % než u konceptu s vertikální osou rotace.

Tabulka 4.3: Otáčky v závislosti na délce modulu a odstředivém zrychlení

		otáčky (1/min)								
	a	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	X	25%	17%	13%	10%	8%	7%	6%	6%	5%
délka (mm)	300	154	189	218	244	268	289	309	328	345
	400	134	164	189	211	232	250	268	284	299
	500	120	147	169	189	207	224	239	254	268
	600	109	134	154	173	189	204	218	232	244
	700	101	124	143	160	175	189	202	214	226
	800	95	116	134	150	164	177	189	201	211
	900	89	109	126	141	154	167	178	189	199
	1000	85	104	120	134	147	158	169	179	189
	1100	81	99	114	128	140	151	161	171	180
	1200	77	95	109	122	134	144	154	164	173
a: odstředivé zrychlení v násobcích **g** **X**: pulzace zrychlení (+ -)										

4.2.2Proporce a zástavbový prostor

Rám stroje bude mít tvar skříně, viz obr. 4.8. Základní rozměr daný délkou rotujícího modulu zůstane přibližně stejný jako při vertikální orientaci osy rotace, v této koncepci ale určuje čelní plochu skříně. Hloubka skříně ovlivňuje stabilitu celého stroje a reakce v uloženích hřídele, nesmí být tedy příliš malá. Zastavěná plocha každopádně klesne, dá se očekávat, že zhruba na polovinu. Potenciálně ohrožený prostor se zmenší na plochu podél jedné stěny. Vzhledem ke skříňovému provedení rámu bude mít obsluha stroje po otevření dveří bezprostřední přístup ke všem funkčním částem zařízení.



4.8.a 4.8.b

Obrázek 4.8: Nárys (4.8.a) a půdorys (4.8.b) zařízení s horizontální osou rotace

4.3 Srovnání

Koncept s horizontální osou rotace má předpokládané pracovní otáčky zhruba o 50 % nižší než koncept s vertikální osou rotace. Navíc může být pracovní cyklus rozdělen na dvě části. V první proběhne při vyšších otáčkách distribuce pryskyřice a v druhé, kdy pryskyřice tuhne, jsou pouze takové, aby byla překonána gravitace. Rotující modul nebude nikdy dokonale vyvážen, a protože odstředivá síla závisí na otáčkách v druhé mocnině, budou síly od nechtěné nevývahy při horizontální orientaci osy podstatně nižší než při vertikální.

Zastavěná plocha je u konceptu s horizontální osou rotace přibližně poloviční, protože největší rozměr zařízení, který je dán délkou rotujícího modulu, určuje čelní plochu rámu. U konceptu s vertikální osou rotace určuje délka modulu půdorys rámu. S tím souvisí i přístupnost stroje pro obsluhu. U konceptu s horizontální osou rotace je při jednoduchém otevření celé čelní plochy bezprostřední přístup k modulu a funkčním částem stroje. U konceptu s vertikální osou rotace modulu je tato osa od kraje rámu natolik vzdálená, že je nutné umožnit obsluze vstup do stroje.

Vzhledem k popsaným výhodám je po konzultaci s firmou MemBrain návrh stroje proveden v konceptu s horizontální orientací osy rotace.

5. Konstrukce zařízení

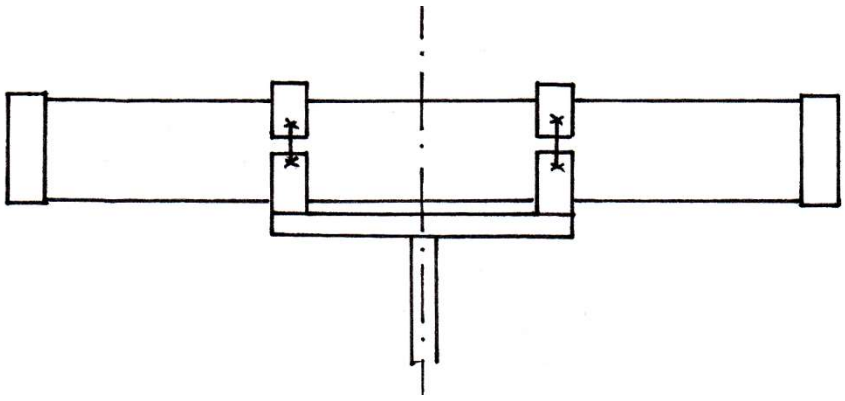
V této kapitole je proveden návrh a popis konstrukce základních částí zařízení. Je zde rozebráno zejména silové namáhání a další konstrukční požadavky pro návrh jednotlivých dílů.

5.1 Upnutí modulu

Kvůli velkému požadovanému rozsahu průměrů a délek modulů bylo potřeba vytvořit dostatečně univerzální způsob jejich spolehlivého upnutí. S ohledem na vysoké otáčky stroje a předpokládanou hmotnost největších modulů okolo 10 kg je nutné se při upínání zaměřit na co nejnižší možnou míru excentricity těžiště modulu, aby se minimalizovalo zatížení stroje odstředivými silami. Tělo modulu je tvořeno trubkou normalizovaných rozměrů, je tedy omezený počet konkrétních vyráběných průměrů. Katalogový list trubek od dodavatele Kupen GF s.r.o., která budou tvořit těla modulů je součástí přílohy.

5.1.1 Koncept upínání

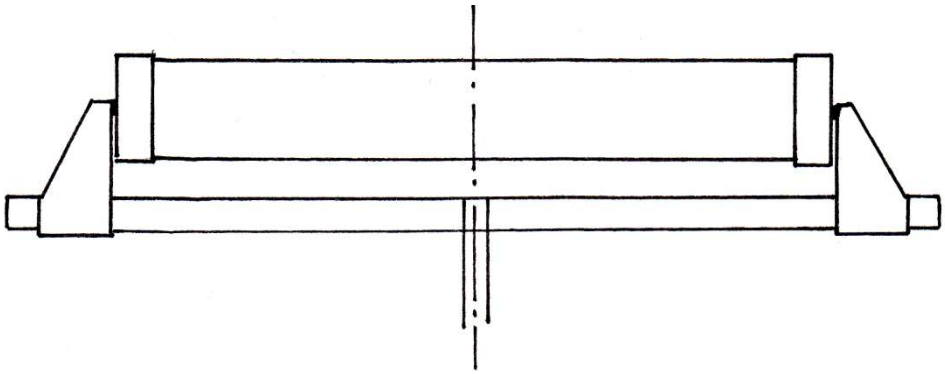
První uvažovanou variantou bylo použití objímek s vložkami (viz obr. 5.1), odpovídajícími danému průměru trubky. Objímky včetně vložek by se daly jednoduše použít například ze stroje určeného pro fúzní svařování těchto trubek, ke kterému jsou dodávány jako náhradní díly. Při tomto způsobu řešení by ale bylo nutné hledat při upínání vždy znovu těžiště sestavy.



Obrázek 5.1: Upnutí modulu pomocí objímek

Druhý návrh pracuje se souměrně se pohybujícími konzolami pomocí pravolevého šroubu, viz obr. 5.2. Upnutí nebude pomocí objímek okolo trubky, ale modul bude uchycen prostřednictvím víček za své konce. Díky tomuto řešení bude mít na seřízeném stroji modul geometrické těžiště vždy na ose rotace, a navíc nebude nutné zajišťovat víčka nezávislým mechanismem.

Víčka modulu se zakládají do konzol, které se pohybují po profilu, a jejich rozteč je s ohledem na délkovou variabilitu modulů přestavitelná pomocí pravolevého trapézového šroubu. Po založení modulu jsou k sobě konzoly stlačeny s předpětím, zajišťujícím těsnost víček.



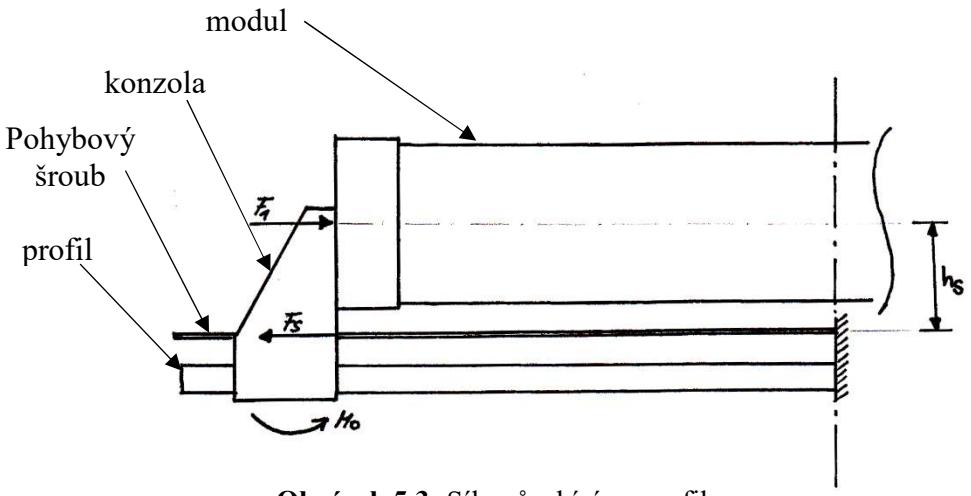
Obrázek 5.2: Upnutí modulu za jeho konce

Dokonalé hmotnostní vyvážení zaručeno není, ale velikost možné excentricity těžiště by měla být výrazně omezena. Nemalou část rotující hmoty tvoří trubka, u které je hmotnostní těžiště prakticky shodné s geometrickým. Nevývahu může přinést rozmístění membránových vláken nebo při zalévání rozdílné množství pryskyřice v koncích modulu. Vlákna sahají od jednoho konce modulu k druhému, jejich podíl na nevývaze bude pravděpodobně velmi malý. Riziko rozdílného množství pryskyřice je částečně ošetřeno tím, že je každý konec modulu napájen zvlášť, z vlastní nádoby. Nestane se tedy, že by množství určené pro oba konce nateklo pouze do jednoho.

Dlouhé moduly malého průřezu, u kterých by mohl nastat problém s uchycením pouze za konce a rizikem možné ztráty stability, nebudou vyráběny.

5.1.2 Nosný profil

Profil, po kterém se pohybují konzoly, je namáhán zejména na ohyb. Síla působící prostřednictvím víčka na konzolu je zachycena silou v trapézovém šroubu a moment daný vzdáleností těchto dvou rovnoběžných sil se přenáší na profil (viz obr. 5.3). Trapézový šroub je uložen v ose rotace modulu, obě poloviny šroubu jsou tedy zatěžovány nezávisle.



Obrázek 5.3: Síly působící na profil

Síla $\boldsymbol{F_1}$ je součtem počátečního předpětí, odstředivé síly dané hmotností víčka a odstředivé síly dané hmotností pryskyřice. Na jednom rameni profilu se ještě přičítá odstředivá síla způsobená excentricitou těžiště modulu. Tedy:

$$F_1 = F_p + \omega^2 \cdot \left[\left(\frac{L_h}{2}\right) \cdot \left(m_{v+} m_p\right) + m_h \cdot e\right], \tag{5.1}$$

kde $\boldsymbol{F_p}$ je síla předpětí, úhlové otáčky stroje, $\boldsymbol{L_h}$ $[\boldsymbol{m}]$ je délka modulu, $\boldsymbol{m_v}$ $[\boldsymbol{kg}]$ hmotnost víčka, $\boldsymbol{m_p}$ $[\boldsymbol{kg}]$ hmotnost pryskyřice, $\boldsymbol{m_h}$ $[\boldsymbol{kg}]$ celková hmotnost modulu a $\boldsymbol{e}$ $[\boldsymbol{m}]$ excentricita těžiště modulu. Přesné poloměry rotace pro výpočet odstředivých sil víčka a pryskyřice jsou ve výpočtech zjednodušeně nahrazovány polovinou délky modulu. Hodnota excentricity je pro účely výpočtu kvůli bezpečnosti stanovena na 5% délky modulu.

Hmotnost pryskyřice je dána její hustotou a objemem. Předpokladem je, že 50 % zalitého objemu v modulu zabírají membránová vlákna. Hmotnost je tedy přibližně

$$m_p \doteq \rho_p \cdot 0{,}5 \cdot \frac{\pi \cdot D_{hi}{}^2}{4} \cdot u, \tag{5.2}$$

kde $\boldsymbol{\rho_p}$ je hustota pryskyřice, a **u** $[\boldsymbol{m}]$ je výška zalití pryskyřice.

Číselně vyjádřeno pro největší modul:

$\omega_1 = 22\ rad \cdot s^{-1}$	(viz kapitola 5.2.1)
$L_h = 1200\ mm$	(délka modulu)
$m_h = 10\ kg$	(předpoklad firmy MemBrain)
$e = 60\ mm$	(5 % délky modulu)
$\rho_p = 1{,}1\ g \cdot cm^{-3}$	(z katalogového listu použitého epoxidu)
$D_{hi} = 85{,}4\ mm$	(z katalogu výrobce trubek pro průměr 110 mm)
$u = 50\ [mm]$	(předpokládaná výška zalití)

Po dosazení rovnice 5.2 do rovnice 5.1 a vyčíslení vyjde: $\boldsymbol{F_1 \cong 455\ N.}$

Nosný profil je vybírán s ohledem na to, aby jeho geometrie umožňovala pohyb a konstrukci konzol zachycujících ohybový i zkrutný moment daný vyložením modulu a provozem stroje. Ocelový profil je při průřezu umožňujícím tuto konstrukci konzol nepřiměřeně hmotný. Jinou uvažovanou variantou bylo použití libovolného profilu a konzoly uložit na lineární vedení, což bylo z ekonomických a konstrukčních důvodů zavrženo, protože se nepodařilo sehnat rozměrově vhodné vedení, jehož vozíky by přenesly předpokládané momentové zatížení. Použití dvou profilů malého průřezu bylo zavrženo z důvodu zvýšeného rizika vibrací, kdy by se jeden profil mohl prohýbat jinak než druhý a docházelo by k pohybu modulu. Nakonec byl zvolen hliníkový profil ze stavebnicového systému firmy MayTec, který má při dostatečném průřezu nízkou hmotnost.

Síla $\boldsymbol{F_1}$ je zachycena silou ve šroubu $\boldsymbol{F_s} = \boldsymbol{F_1}$ za vzniku momentu daného vzdáleností těchto sil $\boldsymbol{h_s}$. Tedy:

$$\mathrm{M_o} = \mathrm{F_1} \cdot \mathrm{h_s} \tag{5.3}$$

Kde $\boldsymbol{M_o}$ je ohybový moment působící na nosný profil a který je na délce mezi konzolami konstantní. Je tedy zřejmé, že snahou při konstrukci bude maximálně přiblížit osu trapézového šroubu ose modulu. Konstrukcí je dosažena vzdálenost $\boldsymbol{h_s = 75\,mm}$ a hodnota ohybového momentu působícího na profil je pro největší modul $\boldsymbol{M_o \cong 34\,Nm}$

Na nosný profil se tento moment přenáší prostřednictvím ložisek konzol. Tahové napětí na profilu od ohybového momentu $\boldsymbol{\sigma_t}$ lze určit jednoduše ze vztahu

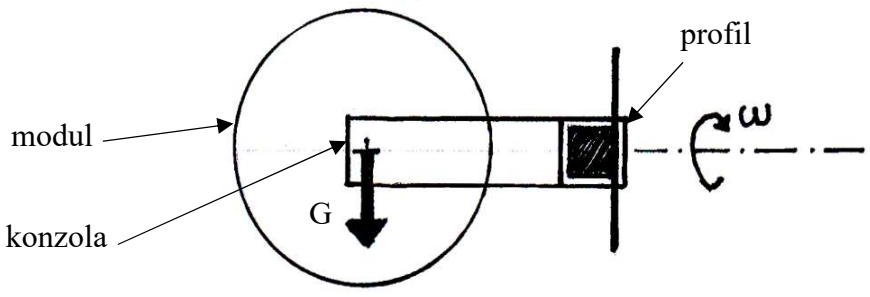
$$\sigma_\mathrm{t} = \frac{\mathrm{M_o}}{\mathrm{W_o}}, \tag{5.4}$$

kde $\boldsymbol{W_o}$ je modul průřezu v ohybu, který lze určit z geometrie průřezu profilu nebo je zadán výrobcem. Zvolený profil má udávaný modul $\boldsymbol{W_o = 6\,cm^3}$**.** Ačkoli je více výrobců těchto profilů, modul průřezu v ohybu se díky vnitřní konstrukci liší. Například profil shodných rozměrů od firmy Item má udávanou hodnotu modulu $\boldsymbol{W_o}$ pouze $\boldsymbol{4,89\,cm^3}$. Při číselném vyjádření tahového napětí v profilu pro největší modul je $\boldsymbol{\sigma_t \cong 5,7\,MPa}$

Napětí v pájeném spoji šroubu je dáno průměrem šroubu a délkou spoje a nemělo by překročit hodnotu $\boldsymbol{100\,MPa}$ [6]. Číselná hodnota pro největší modul je $\boldsymbol{\tau \cong MPa}$ podle vztahu:

$$\tau = \frac{F_S}{\pi \cdot d_S \cdot l_S}. \tag{5.5}$$

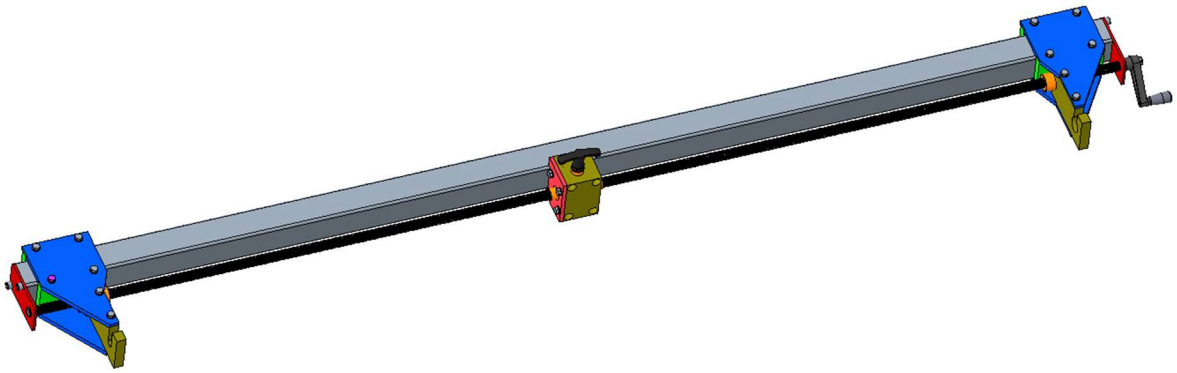
Profil je namáhán také zkrutným momentem (viz obr. 5.4), jehož velikost je dána hmotností modulu a jeho vzdáleností od osy profilu. Při rotaci bude zatížení tímto momentem měnit, což klade nároky na přesnost konzol a jejich ložisek, protože při přílišných vůlích by mohlo docházet ke vzniku vibrací. Čím vyšší budou otáčky stroje, tím méně se tento moment v důsledku momentu setrvačnosti modulu projeví. Také s rostoucí hmotností modulu roste nejen zkrutný moment, ale i moment setrvačnosti.



Obrázek 5.4: Zkrutný moment

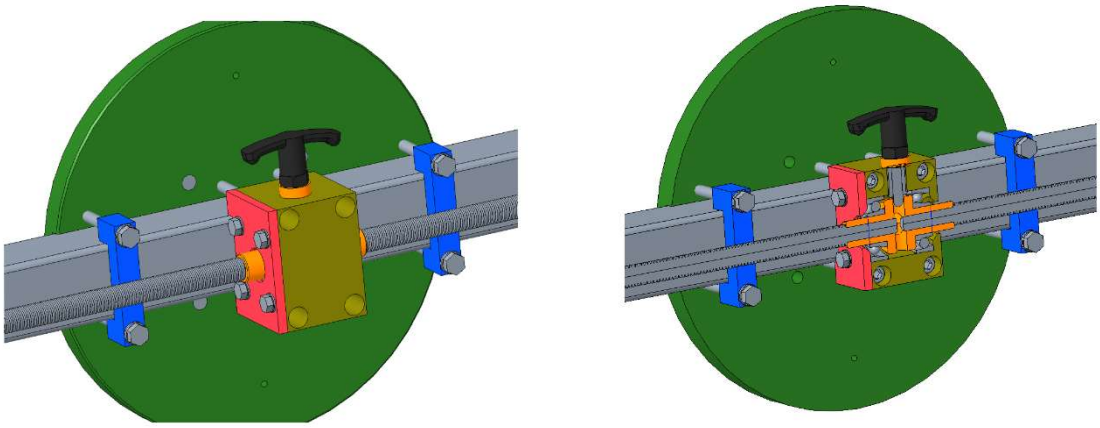
5.1.3 Popis konstrukce

Nosný profil má rozměr 40x40 mm a byl vybrán se stavebnicového systému firmy MayTec. Konzoly jsou vyrobeny z duralových dílů kvůli snížení hmotnosti. Po profilu se pohybují na kluzných ložiscích vyrobených z nylonu. Přírubová trapézová matice na konzolách je od firmy Misumi. Jejím otáčením o 180° lze při seřizování nastavit vzdálenost konzol v krocích po 1 mm (½ stoupání trapézového závitu). Pozice konzol by měla být souměrná vůči ose rotace.



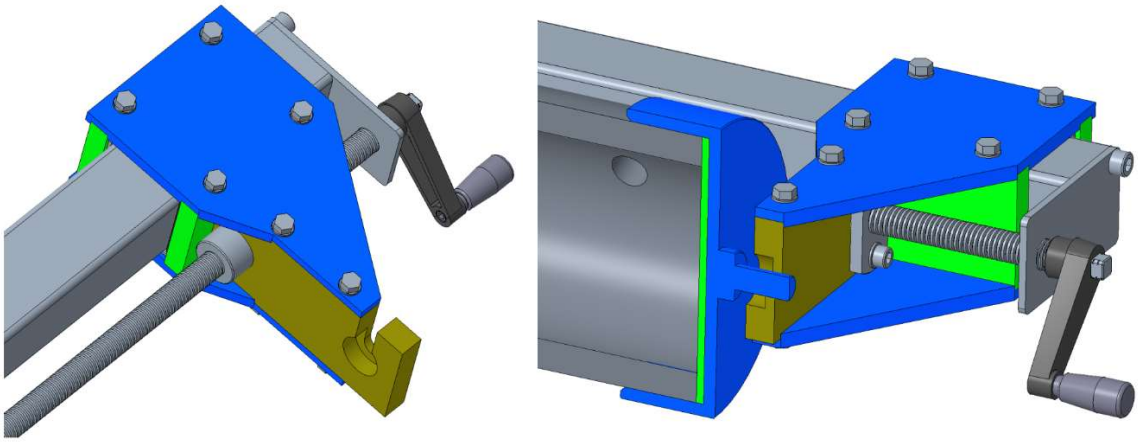
Obrázek 5.5: Celkový pohled na profil a konzoly

Víčko modulu je vyrobeno z vysokomolekulárního polyethylenu UHMW-PE, ke kterému má použitý epoxid velmi nízkou přilnavost. Uvnitř víčka je jednorázová vložka z mikroporézní pryže T100 EP od firmy Gumex, která slouží jako separátor a těsnění, aby epoxid z modulu nepřišel do kontaktu s víčkem. Trn víčka, který slouží k připojení ke konzole, má dva průměry. Menší průměr lze při dostatečném rozevření konzol volně svrchu založit, což usnadňuje manipulaci, a větší průměr zapadne při přiblížení konzol do osazení a slouží jako zámek proti vypadnutí při běhu stroje, viz obr. 5.6.



Obrázek 5.6: detailní pohled na konzolu, vpravo řez konzolou s modulem v poloze před dotažením. Je zde vidět osazení na víčku sloužící k zajištění v konzole

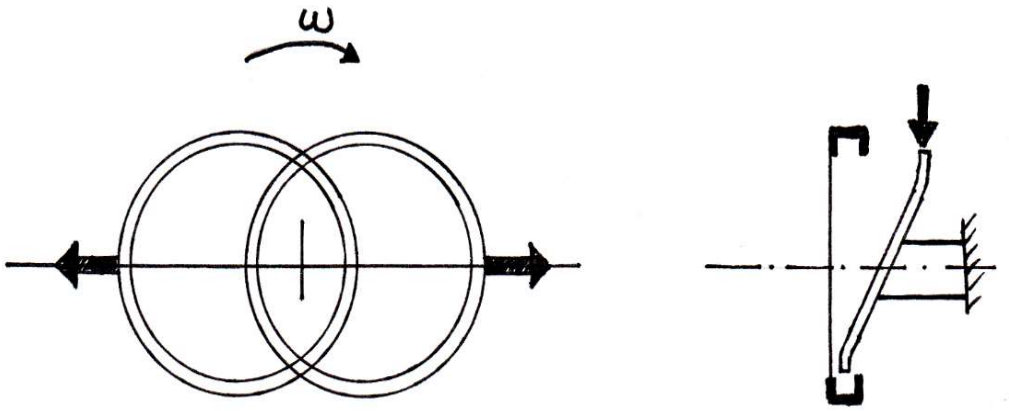
Protože sériově vyráběné pravolevé šrouby se nedodávají v požadované délce, je pohybový šroub složen ze dvou šroubů s levým a pravým stoupáním závitu. Spojovací díl, do kterého jsou osazené konce šroubu natvrdo zapájeny, slouží zároveň k zachycení silových reakcí a aretaci pohybu šroubu. Je uložen v kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem. Zajištění proti pootočení při běhu stroje, čímž by došlo k uvolnění konzol, je realizováno pomocí zajišťovacího čepu od firmy Halder (viz obr. 5.7). Čep je vybaven aretací v otevřené poloze a T rukojeť je zvolena z důvodu snazší vizuální kontroly polohy čepu před spuštěním stroje. Závit šroubu je trapézový Tr 12x2. K nastavování polohy konzol slouží klička, která je odnímatelná, aby nebyla při běhu stroje excentrickou zátěží. Šroub je na koncích podepřen kvůli snazšímu ovládání a omezení kmitání volných konců, nepředpokládá se zde přenos žádného zatížení.



Obrázek 5.7: detailní pohled na spoj a aretaci pohybového šroubu, vpravo je řez ložiskovým domkem a je vidět spojka s ložisky a aretační kolík.

5.2 Nálevka a vedení pryskyřice

Základní součástí pro distribuci epoxidu je nálevka. Při otočení osy rotace do horizontální polohy musel být upraven tvar profilu nálevky, aby mohlo být toto řešení použito. Principem je využití odstředivého zrychlení, které v nálevce vytlačuje epoxid na větší poloměr rotace. Vzdálenost k ose rotace se tedy směrem k výtoku z nálevky musí zvětšovat. Při použití kruhové nálevky, která je výrobně jednoduchá, musí být její střed umístěn excentricky vůči ose rotace modulu, čímž je zvyšování poloměru rotace epoxidu dosaženo, viz obr. 5.8.



5.8.a 5.8.b

Obrázek 5.8: nárys (5.8.a) a bokorys (5.8.b) nálevek. Černé šipky značí tok prysky-řice, na Obr. 5.8.a z nálevek ke koncům modulu a na Obr. 5.8.b přívod nepohybují-cím se vedením do nálevek

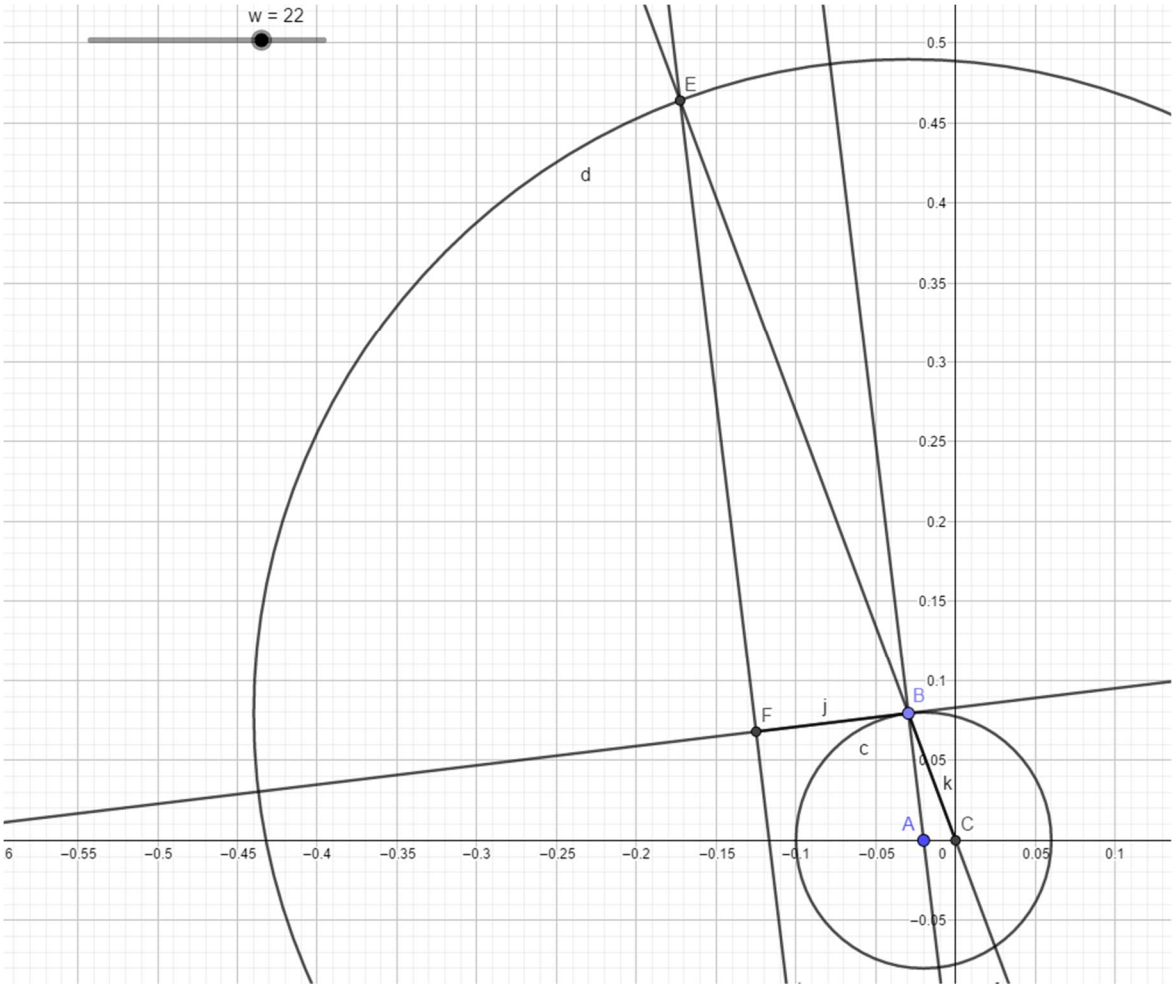
5.2.1 Stanovení pracovních otáček stroje

Ze vztahu pro odstředivé zrychlení (4.5) je zřejmé, že čím větší nálevka, tím menší úhlová rychlost je pro dosažení stejného zrychlení potřeba. Velikost nálevky je limitována délkou zalévaného modulu. Po vytvoření prvních návrhů bylo zřejmé, že nejmenší požadované moduly nebude konstrukčně možné tímto způsobem zalévat, protože zde není žádný prostor pro vedení epoxidu od nálevky do modulu. Po konzultaci s firmou MemBrain byla stanovena nejmenší délka takto zalévaného modulu na 500 mm. Zmenšování nálevky je nutno kompenzovat zvyšováním zalévacích otáček. Protože zalévací otáčky vychází z parametrů nálevky, jsou pro všechny velikosti modulů stejné. Zmenšením nálevek při snaze umožnit zalití modulů kratších než 500 mm by byla potlačena výhoda nižších otáček vyplývající z horizontální orientace osy rotace.

Kratší moduly budou zalévány alternativním systémem, kdy nádobka s potřebným množstvím epoxidu bude umístěna přímo u jejich konců a po zvýšení otáček epoxid krátkou hadičkou pouze přeteče do modulu. Protože krátké moduly budou malých průměrů, bude tento způsob dostačující.

Pro odhadnutí otáček potřebných pro zalévání byl v programu GeoGebra (což je volně dostupný matematický software) vytvořen geometrický model problému (viz obr. 5.9). Bod **C** je zde osou rotace, kružnice **c** se středem v bodě **A** je nálevka. **B** je bod na nálevce, ve kterém je zkoumaná velikost odstředivého zrychlení. Po vynásobení vzdálenosti |**AB**| (tedy poloměru rotace bodu **B**) s druhou mocninou uvažované úhlové rychlosti vyjde velikost odstředivého zrychlení v bodě **B**. Graficky je odstředivé zrychlení vyjádřeno jako průsečík přímky **BC** s kružnicí se středem v bodě **B** a poloměrem o velikosti odstředivého zrychlení. Jeho tečnou složku k nálevce, tedy tu ve směru pohybu epoxidu, získáme jako průmět odstředivého zrychlení do tečny ke kružnici **c** procházející bodem **B**. Nyní lze při pohybu bodu **B** po nálevce sledovat velikost tečné složky

zrychlení (úsečky |**BF**|) a snadno si udělat představu jaký vliv má změna jednotlivých parametrů nálevky (zejména poloměru, excentricity, úhlových otáček). V modelu není uvažován vliv tíhového zrychlení, počítá se pouze s odstředivým zrychlením jako se střední hodnotu.

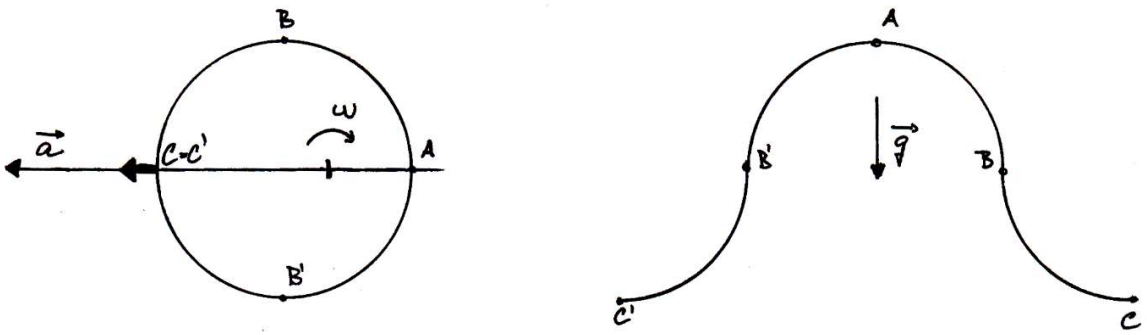


Obrázek 5.9: Geometrický model v programu GeoGebra

Na základě modelu byly stanoveny zalévací otáčky stroje odpovídající průměru a excentricitě nálevek na $\boldsymbol{\omega_z = 22\ rad \cdot s^{-1}}$, tedy $\mathbf{210\ ot \cdot min^{-1}}$**.** Maximální tečné zrychlení je $\boldsymbol{a_t = 9\ m \cdot s^{-2}}$. Jedná se o situaci přibližně odpovídající stavu, kdy stéká tekutina v tíhovém poli po vnější a vnitřní válcové ploše viz obr. 5.10. Tyto zalévací otáčky jsou shodné pro všechny moduly zalévané přes nálevky, protože klíčové jsou poměry na nálevce nezávislé na délce modulu.

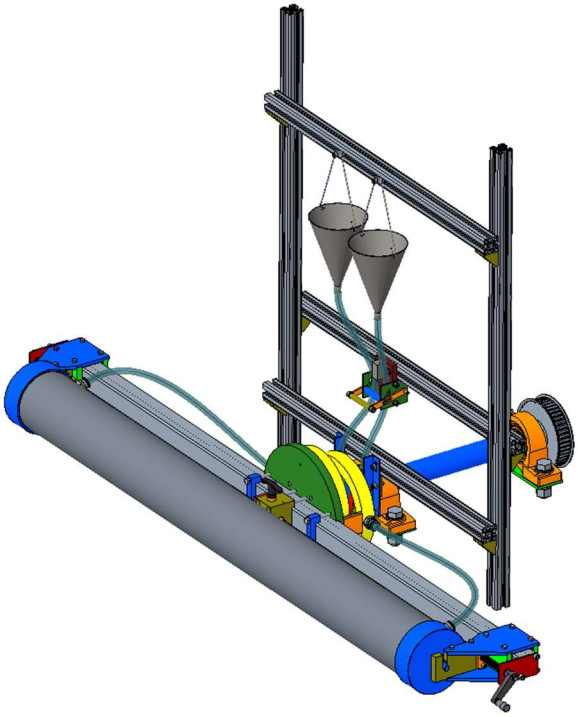
Udržovací otáčky, budou stanoveny pro každý modul zvlášť s ohledem na jeho délku tak, aby odstředivé zrychlení v koncích modulu bylo jeden a půl násobek tíhového zrychlení, čímž je zajištěno, že nebude docházet ke stékání pryskyřice. Vztah pro výpočet otáček:

$$n_u = \frac{60}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{30}{L_h}} \tag{5.6}$$



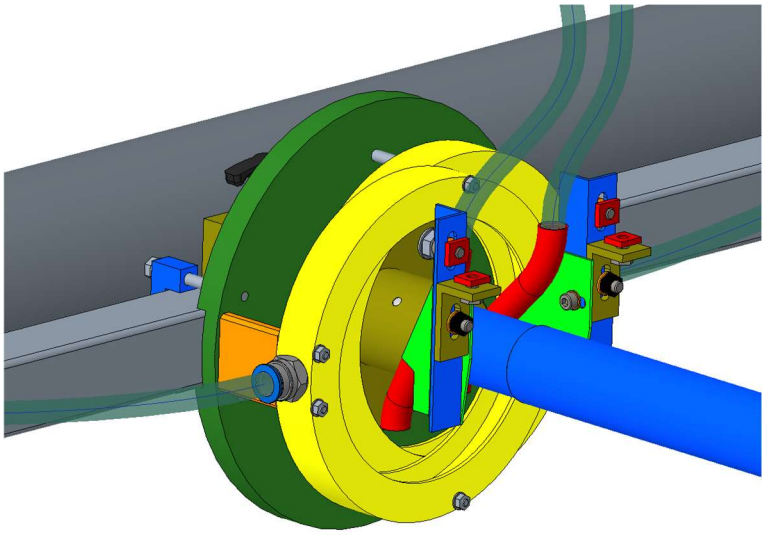
Obrázek 5.10: Analogie nálevky (vlevo) a křivky v tíhovém poli (vpravo). Bod C, resp. C‘ je místem výtoku a přitékající pryskyřice dopadá v průběhu otáčení postupně do všech bodů křivky

5.2.2 Konstrukce nálevek



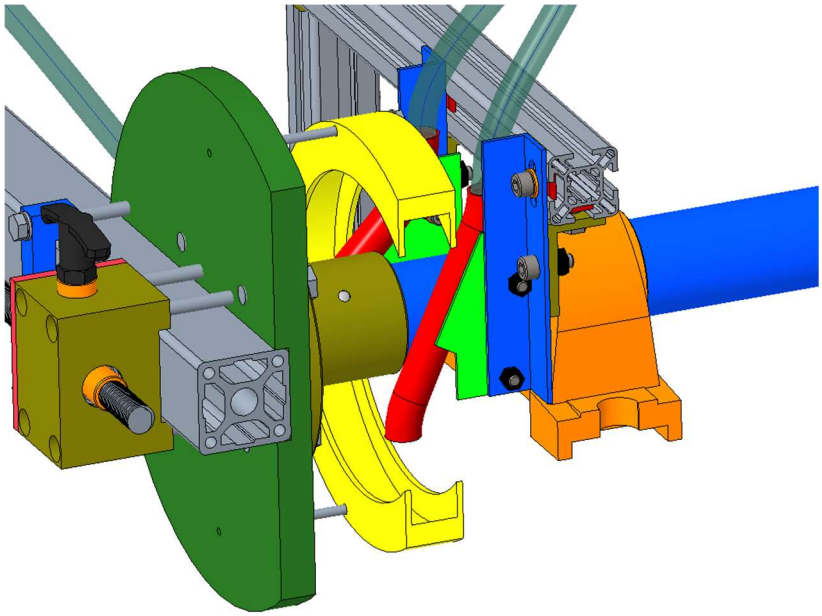
Obrázek 5.11: Celkový pohled na funkční části zařízení, je zde vidět rozvod pryskyřice ze zásobníků přes škrtící ventil do nálevky a následně do konců modulu

Nálevky jsou vyrobeny z UHWM-PE stejně jako víčka modulů. Díky tomu by mělo docházet k zanášení epoxidem v omezené míře. Excentricita středů nálevek vůči ose rotace je **20 mm** (viz obr. 5.12). Hadička pro distribuci epoxidu je silikonová o rozměru 12x1 mm od firmy Gumex. K výtokům z nálevek je připojena buď prostřednictvím nástrčného šroubení pro vzduchotechniku, nebo mosazným hadičníkem. K modulu je hadička připojena opět buď přes nástrčné šroubení nebo hadičník. Konkrétní možnost si zvolí firma MemBrain na základě zkušenosti s provozem.



Obrázek 5.12: Detailní pohled na nálevku

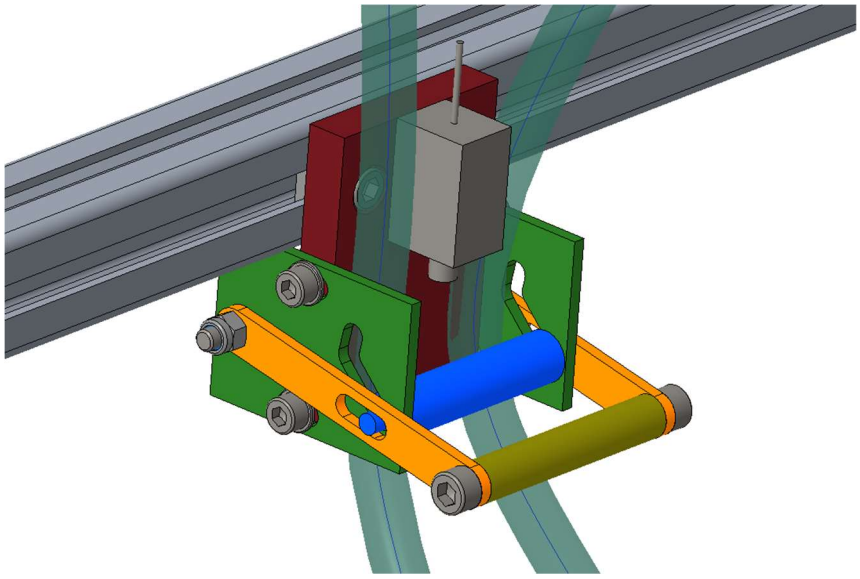
Nátok pryskyřice do nálevky je řešen opět touto hadičkou. Její konec je veden tvarovanou měděnou trubičkou přichycenou k rámu, čímž je zajištěna přesná poloha konce silikonové hadičky vůči nálevce (viz obr. 5.13). Výhoda tohoto řešení je v jednoduchosti údržby, protože nedochází ke znečištění vedení epoxidem a hadička může být po každém použití jednoduše vyměněna.



Obrázek 5.13: Odříznutá část nálevky. Detailní pohled na vedení nátokové hadičky

5.2.3Škrtící ventil

Na hadičkách pod zásobníky epoxidu je elektricky ovládaný škrtící ventil. Díky němu je možné naplnit zásobníky epoxidem před spuštěním stroje a přívod epoxidu do modulu je otevřen až po rozběhu a dosažení zalévacích otáček. Kvůli údržbě stroje byl požadavek, aby byl průtok škrcen stlačením hadičky. Průmyslově vyráběný ventil splňující tyto požadavky se nepodařilo vyhledat, byl tedy vytvořen vlastní návrh (viz obr. 5.14)



Obrázek 5.14: Škrtící ventil

Zaškrcení průtoku je provedeno manuálně, před nalitím epoxidu do zásobníku. Zvednutím rukojeti ventilu do horní polohy dojde ke stlačení hadičky válcem vedeným v drážkách. Tlakem hadičky a tvarem drážek válec v této poloze drží. Uvolnění je provedeno pomocí tlačného elektromagnetu, který válec směrem dolů vytlačí ze stabilní polohy a dojde k úplnému uvolnění stisku hadičky.

5.3 Hřídel

Hřídel a jeho uložení je z důvodu bezpečnosti záměrně předimenzované. Hřídel je namáhán zkrutným momentem při rozběhu stroje, silou v řemeni a odstředivou silou danou excentricitou těžiště modulu.

5.3.1 Namáhání hřídele

Maximální odstředivá síla je stanovena ze zalévacích otáček, hmotnosti největšího modulu a teoretické velikosti excentricity těžiště podle vztahu:

$$F_o = m_h \cdot e \cdot \omega^2 \cong 290\ \mathrm{N}, \tag{5.7}$$

kde $\boldsymbol{F_o}$ je odstředivá síla, $\boldsymbol{m_h = 10\ kg}$ maximální předpokládaná hmotnost modulu, $\boldsymbol{\omega = 210\ ot \cdot min^{-1}}$ otáčky a $\boldsymbol{e = 60\ mm}$ excentricita.

Zkrutný moment na hřídeli je roven pouze dynamickému momentu při rozběhu, protože při běhu stroje jsou překonávány pouze pasivní odpory. Jeho velikost je tedy určena momentem setrvačnosti rotujících částí a úhlovým zrychlením. Tabulka 5.1 obsahuje díly a jejich podíl na velikosti celkového momentu setrvačnosti.

Tabulka 5.1: Momenty setrvačnosti k ose rotace

součást	vzorec	J [kg.m^2]
modul	$\frac{1}{12} m \cdot l^2$	1,2
profil		0,3
šroub		0,14
konzoly	$2 \cdot m \cdot r^2$	0,55
víčka		0,08
kotouč	$\frac{1}{2} m \cdot r^2$	0,024
řemenice		0,005
hřídel		0,001
celkový moment setrvačnosti k ose rotace [kg.m^2]		2,3

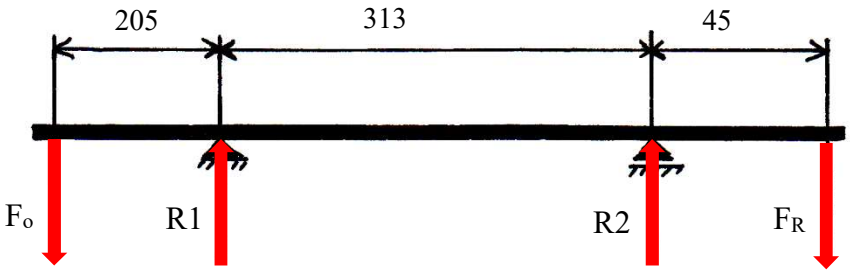
Celkový moment setrvačnosti je pro největší modul přibližně $\boldsymbol{2,3\ kg \cdot m^2}$. Budeme-li uvažovat rovnoměrně zrychlený pohyb a dobu rozběhu stroje $\boldsymbol{t_R = 30\ s}$ z nulových otáček na zalévací $\boldsymbol{\omega_z = 210\ ot \cdot min^{-1}}$, je zjednodušeně velikost dynamického rozběhového momentu $\boldsymbol{M_D \cong 1,68\ Nm}$ podle vztahu 5.7.

$$M_D = J \cdot \varepsilon \cong J \cdot \frac{\omega_z}{t_R} \tag{5.8}$$

Přenos výkonu na hřídel je realizován ozubeným řemenem. Ten není nutné významně předepínat, je tedy ve výpočtu uvažována pouze síla v zatížené větvi. Ta je určena z přenášeného momentu a roztečného průměru řemenice podle vztahu:

$$F_R = \frac{2 \cdot M_D}{d_R} \cong 28\ N \tag{5.9}$$

Kde $\boldsymbol{F_R}$ je síla v řemeni a $\boldsymbol{d_R = 122\ mm}$ roztečný poloměr řemenice. Největší deformace hřídele nastane, působí-li síly v jedné rovině. Kontrolně je určeno napětí v hřídeli pro případ znázorněný na obrázku 5.15:

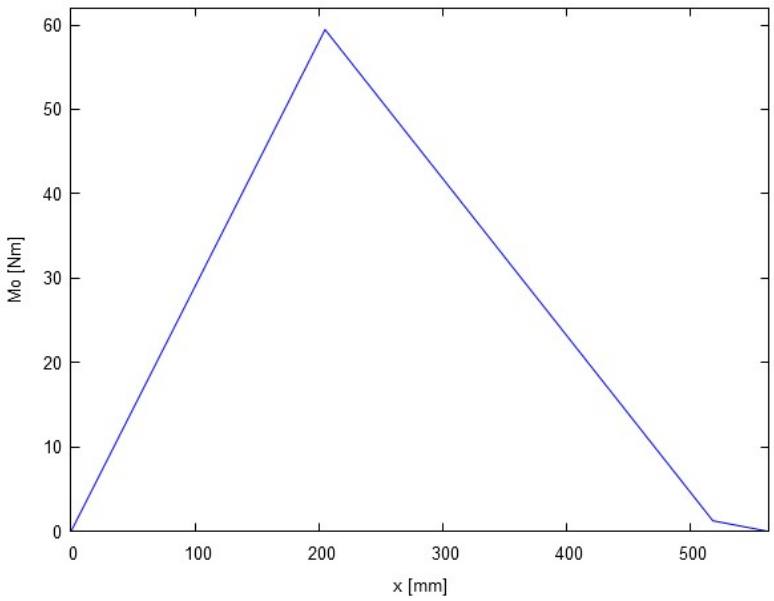


Obrázek 5.15: Schematické znázornění sil pro kontrolní výpočet

Z rovnic silové rovnováhy $\boldsymbol{R1 = 476\ N}$ a $\boldsymbol{R2 = -158\ N}$. Průběh ohybového momentu je znázorněn v grafu na obrázku 5.16. Tahové napětí v hřídeli v místě maximálního ohybového momentu je podle vztahu 5.10:

$$\sigma_t = \frac{M_o}{W_o} = \frac{32 \cdot M_o}{\pi \cdot d^3}, \tag{5.10}$$

kde $\boldsymbol{\sigma_t}$ je tahové napětí v hřídeli, $\boldsymbol{M_o}$ ohybový moment, $\boldsymbol{W_o}$ modul průřezu hřídele v ohybu a $\boldsymbol{d}$ průměr hřídele. V místě největšího ohybového momentu vychází tahové napětí v hřídeli $\boldsymbol{\sigma_t \cong 9,5\ MPa}$



Obrázek 5.16: Graf ohybového momentu působícího na hřídel při silovém zatížení dle obr. 5.15

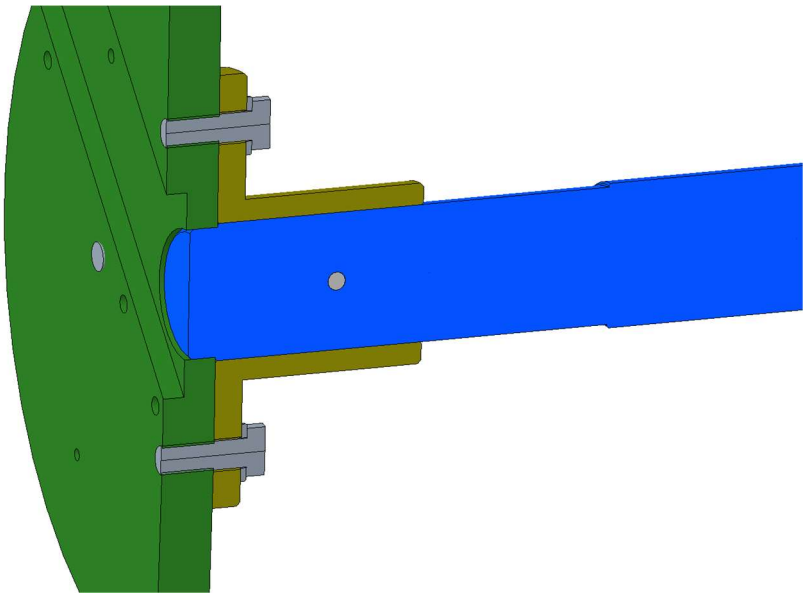
Druhý případ, kdy působí síly na hřídel v jedné rovině, je v okamžiku, kdy odstředivá síla $\boldsymbol{F_o}$ působí opačným směrem než na obrázku 5.15. Vzhledem k nízkému napětí, které vyšlo kontrolním výpočtem výše, a protože není důvod očekávat extrémně jinou hodnotu, nebyla hodnota napětí pro tento případ počítána.

5.3.2Konstrukce

Nosný profil unašeče je připojen pomocí svěrných objímek a kolíků pro fixaci polohy ke kotouči a ten, pomocí náboje zajišťujícího kolmost, k hřídeli (viz obr. 5.17). Hřídel je uložen ve dvou ložiskových domcích od firmy Misumi. Dynamická únosnost ložisek je **29,5** a **25,7 kN**. Vzhledem k velmi nízkému přenášenému kroutícímu momentu je náboj na hřídeli zajištěn pouze kolíkem o průměru 5 mm. Maximální zkrutný moment, který kolík na průměru hřídele 38 mm přenese, je dán vztahem:

$$M_k = T \cdot d = \tau_{kl} \cdot S \cdot d \tag{5.11}$$

Kde $\boldsymbol{M_k}$ je zkrutný moment, $\boldsymbol{T}$ smyková síla působící na průřez kolíku, $\boldsymbol{d}$ průměr hřídele, $\boldsymbol{\tau_{kl}}$ mez kluzu kolíku ve smyku a $\boldsymbol{S}$ průřez kolíku. Z Mohrovy kružnice pro jednoosou napjatost je mez kluzu ve smyku jedna polovina meze kluzu v tahu. Pro automatovou ocel, z níž je kolík vyroben je uvažována mez kluzu v tahu $\boldsymbol{R_e = 200\,MPa}$. Po číselném dosazení je maximální zkrutný moment, který spoj přenese, $\boldsymbol{M_k = 72\,Nm}$. Je zde tedy dostatečná rezerva.

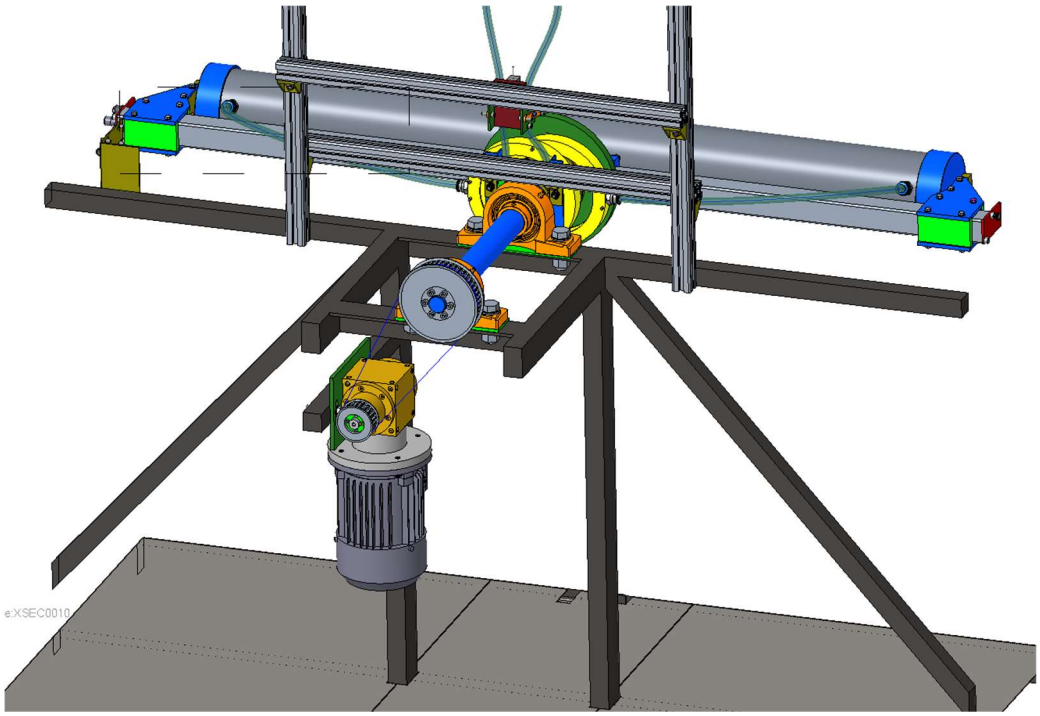


Obrázek 5.17: Řez připojením kotouče na hřídel

5.3.3 Pohonná jednotka

Pohon je realizován asynchronním 2 pólovým elektromotorem o výkonu **0,37 kW**. Velikost rámu motoru je **71M** a je připojen k převodovce pomocí příruby (viz obr 5.18). Převodovka je vybrána kuželová od firmy MATIS s převodovým poměrem $\boldsymbol{i = 4}$ do pomala. Do výchozí polohy bude rotor natočen manuálně. Z toho důvodu nemůže být použita šneková převodovka, která by byla levnější a pro tuto aplikaci dostatečná. Na výstupní hřídel převodovky je přes upínací pouzdro připojena ozubená řemenice a hřídel je poháněna ozubeným řemenem s profilem HTD-5M o šířce 20 mm. Převodový poměr řemenového převodu je $\boldsymbol{i = 2}$, celkový převodový poměr je tedy $\boldsymbol{i = 8}$. Díky tomu by měly být otáčky motoru dostatečné pro jeho vlastní chlazení i při nízkých otáčkách modulu.

Řízení otáček je realizováno frekvenčním měničem. Jeho výběr a konfigurace již není součástí této práce.

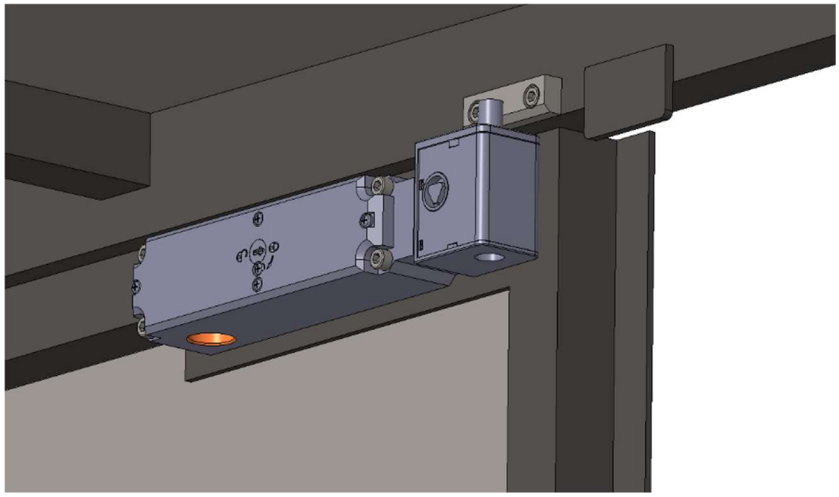


Obrázek 5.18: Pohonná jednotka

5.4 Skříň

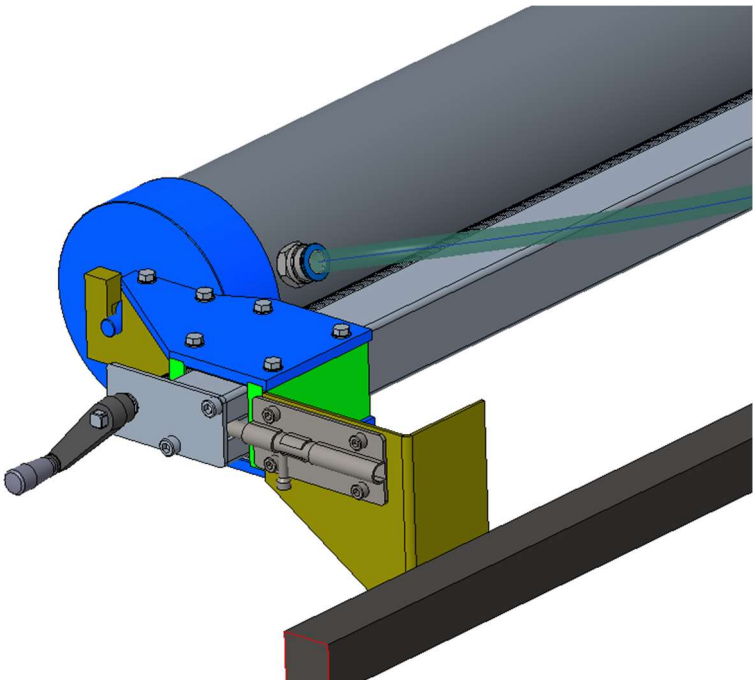
Skříň je svařenec z ocelových profilů typu jäkl a po svaření je žárově zinkována. Základní použitý rozměr je 50x30x2 mm a 30x30x2 mm. Plášť je z pozinkovaného plechu. Po obvodu rotujících částí má tloušťku 1,5 mm z důvodu ohrožení přímým nárazem, záda a dveře skříně jsou opláštěny plechem s tloušťkou pouze 0,8 mm. Dvoukřídlé dveře přes celou přední stěnu jsou vybaveny inspekčním okénkem pro kontrolu stavu stroje. Skříň je přes pryžové bloky firmy Fisatech kotvena do podlahy a do zdi.

Dveře stroje jsou zamčeny po celou dobu rotace modulu, zamykání je řízeno elektronicky. Byly použity dva elektromagnetické zámky od firmy Euchner, typ TK (viz obr. 5.19), které jsou namontovány na jednom dveřním křídle nahoře a dole, a toto křídlo drží druhé. Zamykací cívky jsou v pozici „odemčeno“ pokud jsou pod napětím. Při výpadku proudu tedy nedojde k neřízenému odemčení stroje v okamžiku, kdy by mohl modul ještě rotovat. Stroj se otevírá stiskem tlačítka umístěného u madla dveří.

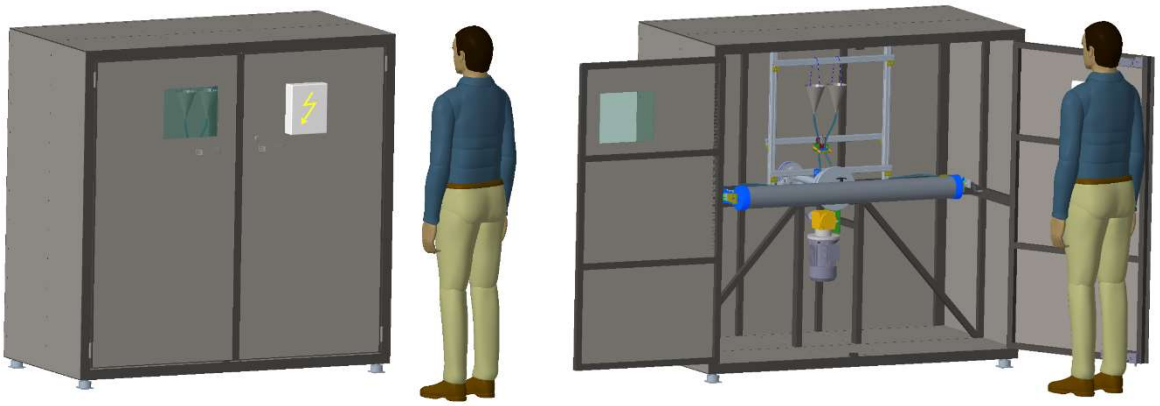


Obrázek 5.19: Detail elektromagnetického zámku na dveřním křídle

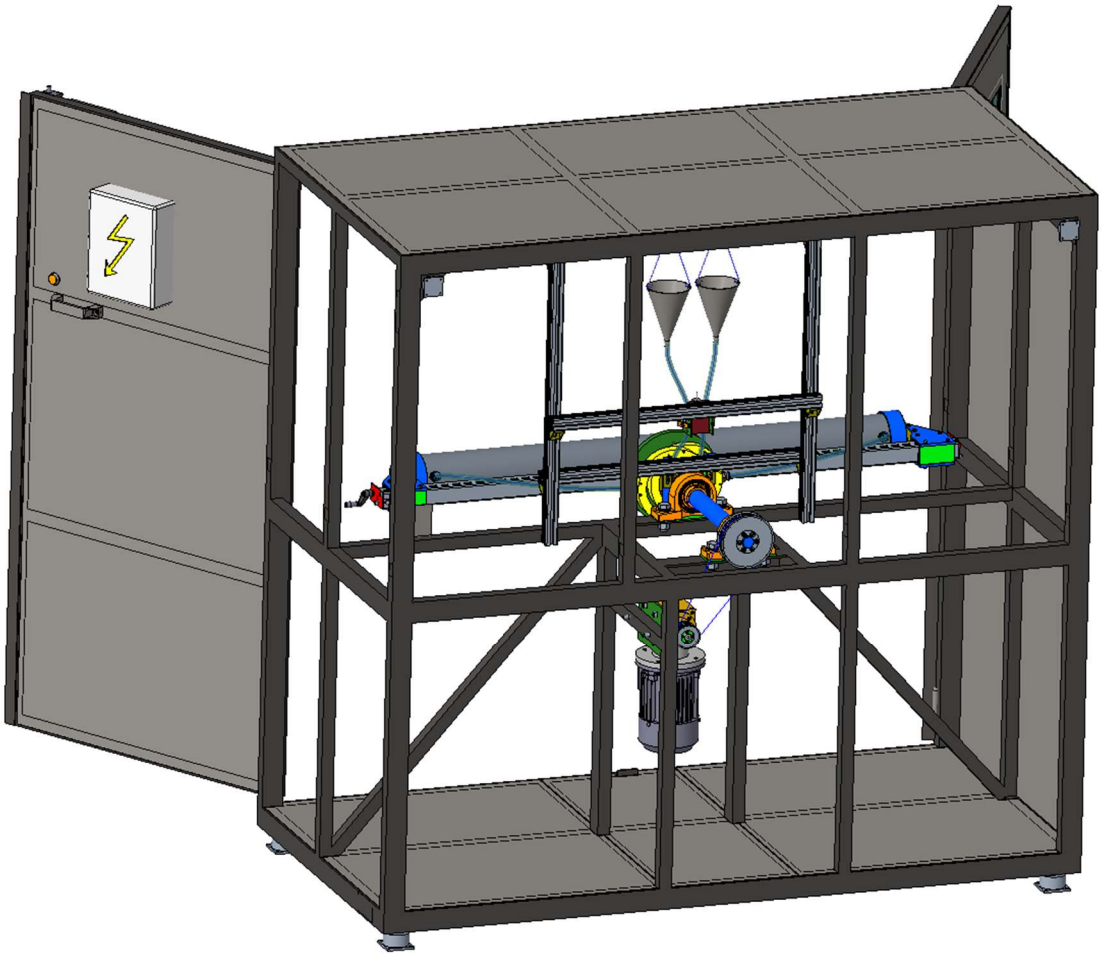
Uvnitř skříně je vestavba z duralových stavebnicových profilů, která nese zásobníky epoxidu a škrtící ventil. Díky stavebnicovému systému je zde prostor pro snadnou dodatečnou změnu nebo úpravu systému rozvodu epoxidu nebo doplnění jiných technologií. Pro pohodlné zakládání modulů lze profil v základní poloze zajistit mechanickou zástrčí, viz obr.5.20.



Obrázek 5.20: Detail zajištění profilu při zakládání modulů



Obrázek 5.21: Celkový pohled na zařízení



Obrázek 5.22: Částečně odkrytované zařízení – celkový pohled

6. Popis pracovního cyklu zařízení

Popis pracovního cyklu je zde uveden pro ilustraci práce zařízení v průběhu výroby modulu

6.1 Přípravná fáze

Přípravná fáze probíhá na odděleném pracovišti. Na plášti modulu jsou připraveny otvory pro přívod epoxidu a osazeny šroubením pro připojení hadičky. Modul je naplněn membránovými vlákny. Poté jsou nasazena technologická víčka s pěnovým těsněním, která uzavřou tubus a umožní zalití

Modul je upnut do stroje a do řídící jednotky jsou zadány parametry modulu potřebné pro určení otáček. V případě potřeby jsou vyměněny hadičky distribuující epoxid a hadička od nálevek je připojena k otvorům v plášti modulu. Je uzavřen škrtící ventil na vedení epoxidu a do zásobníků nalito množství potřebné pro daný průměr modulu včetně experimentálně stanoveného množství, které pravděpodobně zůstane ve vedení. Je uvolněna zástrč, která brání modulu v otáčení a stroj je spuštěn.

6.2 Strojní fáze

Řídící jednotka ověří, jestli jsou obě dveřní křídla v poloze „zavřeno“ a je roztočen modul. Při dosažení zalévacích otáček je otevřen škrtící ventil a epoxid natéká přes vedení a nálevky do konců modulu. Po uplynutí doby k přetečení epoxidu do modulu dojde k plynulému zpomalení na udržovací otáčky, kterými bude modul rotovat až do ztuhnutí epoxidu. Po úplném zastavení modulu je umožněno odemčení dveří.

6.3 Dokončovací fáze

Unašeč je obsluhou dotočen do výchozí polohy, zajištěn a modul je vyjmut. Jsou z něj sundána víčka a odříznuty konce modulu tak, aby nedošlo k porušení těsnosti, ale obnovila se průchodnost membránových vláken. Dále je na konce modulu nalepeno šroubení pro připojení do obvodu a otvory v plášti jsou opatřeny šroubením pro odvod permeátu.

7. Základní parametry zařízení

V tabulce 7.1 je přehled základních rozměrových parametrů a v tabulce 7.2 jsou vypočteny hodnoty působících sil pro největší modul při udržovacích a zalévacích otáčkách a kontrolně hodnoty pro vyšší otáčky, které by v provozu neměly nastat.

Tabulka 7.1: Základní rozměrové parametry

výška	1 690 **mm**	**příkon elektromotoru**	0,37 **kW**
šířka	1 720 **mm**		
hloubka	870 **mm**	**váha**	± 250 **kg**
maximální délka modulu			1 200 **mm**
minimální délka modulu			300 **mm**
minimální délka modulu pro použití nálevek			500 **mm**
maximální vnější průměr modulu			110 **mm**

Tabulka 7.2: působící síly - největší modul

pro modul 1 200 mm, 10 kg		**udržovací**	**zalévací**	**maximální**	**kapitola**
otáčky	**n [ot/min]**	50	210	350	kap. 5.2.1
tahová síla v pohybovém šroubu	**F_1 [N]**	100	455	1100	kap. 5.1.2
napětí v pájeném spoji šroubu	**τ [N]**	0,13	0,6	1,48	
ohybový moment na profilu	**M_o [Nm]**	7,6	34	84	
tahové napětí na profilu	**σ_t [MPa]**	1,3	5,7	14	
odstředivá síla při teoretické nevývaze 6 % délky modulu	**F_o [N]**	17	290	804	kap. 5.3.1
reakce v ložiscích (kontrolně)	**|R1| [N]**	24	476	1300	
	|R2| [N]	21	158	500	
ohybový moment na hřídeli	**M_o [Nm]**	3,5	60	165	
tahové napětí na hřídeli	**σ_t [MPa]**	0,5	9,5	26	

8. Pokyny pro elektrifikaci zařízení

Tato kapitola obsahuje jednoduchý popis základních funkcí a kontrolních mechanismů, se kterými je při konstrukci zařízení počítáno.

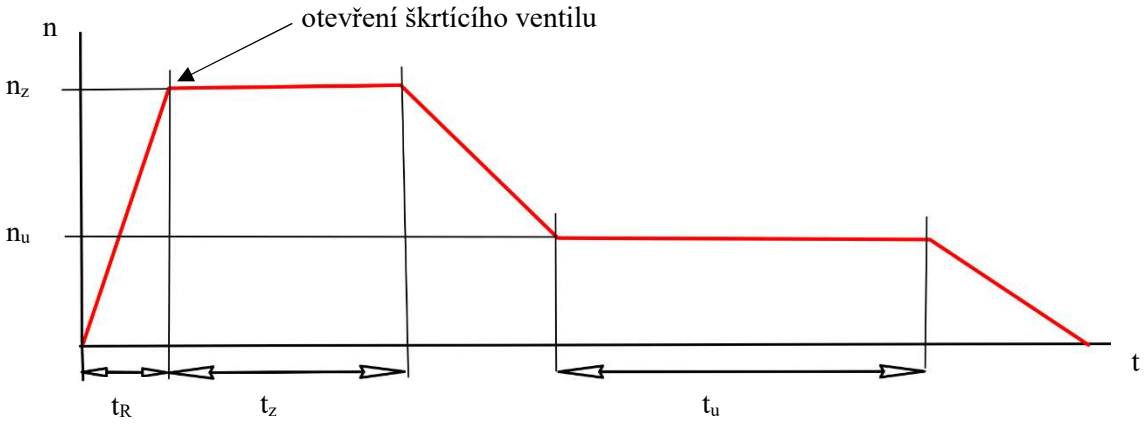
8.1 Řízení otáček stroje

Jak již bylo popsáno, v průběhu pracovního cyklu má velikost otáček dvě hodnoty. Jejich plynulá změna by měla být řízena elektronicky. Jako vstupní hodnoty pro určení časového průběhu otáček jsou uvažovány zejména délka a průměr zalévaného modulu, které obsluha zadá řídícímu programu, případně vybere z nabídky. Program na základě délky modulu se nejprve určí zalévací otáčky. Pokud je modul delší než 500 mm, mají zalévací otáčky předpokládanou hodnotu $\boldsymbol{n_z = 210\ ot \cdot min^{-1}}$. Je-li modul kratší než 500 mm, jsou zalévací otáčky přibližně podle vztahu 8.1.

$$n_z = \frac{60}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{250}{L_h}}. \tag{8.1}$$

Udržovací otáčky $\boldsymbol{n_u}$ budou určovány pro konkrétní délky modulu podle vztahu 5.6.

Na průměru modulu závisí množství pryskyřice a z něj je na základě experimentu určena doba potřebná pro zatečení pryskyřice do modulu, tedy čas $\boldsymbol{t_z}$, po který má modul zalévací otáčky $\boldsymbol{n_z}$. Dále je z množství pryskyřice stanovena doba tuhnutí, tedy čas $\boldsymbol{t_u}$, po který má modul udržovací otáčky $\boldsymbol{n_u}$. Náběh stroje na zalévací otáčky je s ohledem na dynamické účinky plynulý a trvá čas $\boldsymbol{t_R}$. Po dosažení zalévacích otáček je otevřen škrtící ventil na vedení pryskyřice. Průběh otáček je znázorněn na obrázku 8.1. Hodnoty časových úseků i otáček budou na základě provozu zpřesňovány.



Obrázek 8.1: schematické znázornění průběhu otáček

8.2 Zabezpečení a obsluha zařízení

Základní funkcí zabezpečovacího zařízení je zamezení přístupu obsluhy do stroje, pokud modul rotuje. Dveře skříně jsou vybaveny dvěma elektromagnetickými zámky, k jejich správné funkci je však nezbytné doplnit čidla kontrolující polohu obou dveřních křídel. Pro správné uzamčení je nutné, aby byla obě dveřní křídla úplně zavřená. Jinak by mohlo dojít k situaci, kdy se dveřní zámky zamknou při otevřených dveřích nebo bude zavřeno pouze jedno dveřní křídlo.

Zámky jsou v poloze „zamčeno“ drženy pružinou a do polohy „odemčeno“ se dostávají průchodem elektrického proudu ovládací cívkou. Odemčení dveří je realizováno stiskem tlačítka v blízkosti madla na dveřním křídle. Zámek musí být držen v poloze „odemčeno“ po dobu stisku tlačítka a následně do té doby, než budou obě dveřní křídla v pozici „zavřeno“.

Odemčení dveří nesmí být umožněno, pokud je modul v pohybu a jsou-li dveře v poloze „otevřeno“ nebo zámky v poloze „odemčeno“, nesmí být umožněno spuštění motoru.

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout konstrukci zařízení pro odstředivé zalévání membránových modulů. Jsou zde rozebrány dva odlišné koncepty konstrukce zařízení, s horizontální a vertikální osou rotace modulu. Pro oba koncepty je proveden výpočet předpokládaných provozních otáček, jakožto základního parametru zařízení. Koncept s horizontální osou rotace má předpokládané provozní otáčky zhruba o 50 % nižší než koncept s vertikální osou rotace. U horizontální orientace osy rotace může být navíc pracovní čas rozdělen na dvě části. V první proběhne při vyšších otáčkách distribuce zalévací pryskyřice a v druhé, kdy pryskyřice tuhne, jsou otáčky nižší – pouze takové, aby byla v koncích modulu překonána gravitace.

Po srovnání obou konceptů zejména z hlediska provozních otáček, zastavěné plochy a přístupnosti pro obsluhu byl vybrán koncept s horizontální osou rotace a podle něj je navržena konstrukce zařízení.

V práci jsou popsány základní konstrukční uzly stroje, jako je způsob upínání modulů, distribuce zalévací pryskyřice do konců modulu a pohon a uložení rotujících součástí. Dle zadání byla vytvořena kompletní výkresová dokumentace zařízení, která je součástí přílohy.

Seznam použité literatury

[1] Drábková S. a kolektiv: Mechanika tekutin. Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1508-4

[2] Hasal P., Schreiber I., Šnita D. a kolektiv: Chemické inženýrství I. Praha, 2007

[3] Kletečka J., Fořt P.: Technické kreslení. Brno, 2012. ISBN 978-80-251-1887-0

[4] Leinveber J., Vávra P.: Strojnické tabulky, 6. vydání. Úvaly, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8

[5] Pustka Z.: Základy konstruování: tvorba výkresové dokumentace. Liberec, 2010. ISBN 978-80-7372-615-7

[6] Pešík L.: Části strojů: stručný přehled, Díl 1. Liberec, 2015. ISBN 978-80-7494-183-2

[7] Pešík L.: Části strojů: stručný přehled, Díl 2. Liberec, 2015. ISBN 978-80-7494-184-9

[8] Válek R., Malý D.: Membrány pro separaci plynů ve formě dutých vláken: výroba, testování a vlastnosti. Stráž pod Ralskem, 2016. Interní dokument MemBrain s.r.o.

[9] US patent 4 190 411 [online] 1980, [23.6.2019]. Dostupné z: https://patents.google.com/patent/US4190411A/en

[10] US patent 4 227 295 [online] 1980, [23.6.2019]. Dostupné z: https://patents.google.com/patent/US4227295A/en?oq=4227295

Seznam obrázků

Obrázek 1.1	Ilustrační obrázek – membránový modul	Vlastní obrázek	Str.18
Obrázek 1.2	Ilustrační obrázek - vinutý a trubkový modul	[2]	Str.19
Obrázek 1.3	Ilustrační obrázek – řez modulem	http://www.forwardosmosistech.com/according-to-osmosis-energy-pressure-retarded-osmosis-using-hollow-fibers-is-now-a-viable-means-of-energy-production/ [23.6.2019], upraveno	Str. 20
Obrázek 1.4.a	Obrázek z patentu	[10]	Str. 21
Obrázek 1.4.b	Obrázek z patentu	[9]	Str. 21
Obrázek 1.5	Obrázek z patentu	[9]	Str. 21
Obrázek 3.1	Module potting system, Philos	http://www.philosmembrane.com/default/e03/01.php [23.6.2019]	Str. 22
Obrázek 4.1	Koncept zařízení s horizontální osou rotace	Vlastní obrázek	Str. 23
Obrázek 4.2	Ilustrační obrázek – kapalina v relativní rovnováze při rotaci kolem svislé osy	Vlastní obrázek	Str. 23
Obrázek 4.3	Hladinoplocha pryskyřice v modulu při rotaci kolem vertikálně orientované osy	Vlastní obrázek	Str .24
Obrázek 4.4	Bokorys a půdorys zařízení s vertikální osou rotace	Vlastní obrázek	Str. 27
Obrázek 4.5	Koncept zařízení s horizontální osou rotace	Vlastní obrázek	Str. 28
Obrázek 4.6	Vektory působících zrychlení v průběhu otáčky	Vlastní obrázek	Str. 29
Obrázek 4.7	Pulzace výsledného zrychlení v průběhu otáčky	Vlastní obrázek	Str. 29
Obrázek 4.8	Nárys a půdorys zařízení s horizontální osou rotace	Vlastní obrázek	Str. 30
Obrázek 5.1	Upnutí modulu pomocí objímek	Vlastní obrázek	Str. 32
Obrázek 5.2	Upnutí modulu za jeho konce	Vlastní obrázek	Str. 33
Obrázek 5.3	Síly působící na profil	Vlastní obrázek	Str. 33
Obrázek 5.4	Zkrutný moment	Vlastní obrázek	Str. 35
Obrázek 5.5	Celkový pohled na profil a konzoly	Vlastní obrázek	Str. 36
Obrázek 5.6	Detailní pohled na konzolu	Vlastní obrázek	Str. 36
Obrázek 5.7	Detailní pohled na spoj a aretaci pohybového šroubu	Vlastní obrázek	Str. 37
Obrázek 5.8	Nárys a bokorys nálevek	Vlastní obrázek	Str. 38
Obrázek 5.9	Geometrický model v programu GeoGebra	Vlastní obrázek	Str. 39
Obrázek 5.10	Analogie nálevky a křivky v tíhovém poli	Vlastní obrázek	Str. 40
Obrázek 5.11	Celkový pohled na funkční části zařízení	Vlastní obrázek	Str. 40
Obrázek 5.12	Detailní pohled na nálevku	Vlastní obrázek	Str. 41
Obrázek 5.13	Odříznutá část nálevky	Vlastní obrázek	Str. 41
Obrázek 5.14	Škrtící ventil	Vlastní obrázek	Str. 42
Obrázek 5.15	Schematické znázornění sil pro kontrolní výpočet	Vlastní obrázek	Str. 44
Obrázek 5.16	Graf ohybového momentu působícího na hřídel	Vlastní obrázek	Str. 44
Obrázek 5.17	Řez připojením kotouče na hřídel	Vlastní obrázek	Str. 45
Obrázek 5.18	Pohonná jednotka	Vlastní obrázek	Str. 46
Obrázek 5.19	Detail elektromagnetického zámku na dveřním křídle	Vlastní obrázek	Str. 47
Obrázek 5.20	Detail zajištění profilu při zakládání modulů	Vlastní obrázek	Str. 47
Obrázek 5.21	Celkový pohled na zařízení	Vlastní obrázek	Str. 48
Obrázek 5.22	Částečně odkrytované zařízení – celkový pohled	Vlastní obrázek	Str. 48
Obrázek 8.1	Schematické znázornění průběhu otáček	Vlastní obrázek	Str. 51

Seznam tabulek

Tabulka 4.1	Závislost předpokládaných otáček na úhlu sklonu pryskyřice	Vlastní tabulka	Str. 27
Tabulka 4.2	Velikost rozdílu **A** pro daný průměr modulu a úhel sklonu pryskyřice	Vlastní tabulka	Str. 27
Tabulka 4.3	Otáčky v závislosti na dálce modulu a odstředivém zrychlení	Vlastní tabulka	Str. 30
Tabulka 5.1	Momenty setrvačnosti k ose rotace	Vlastní tabulka	Str. 43
Tabulka 7.1	Základní rozměrové parametry	Vlastní tabulka	Str. 50
Tabulka 7.2	Působící síly - největší modul	Vlastní tabulka	Str. 50

Seznam příloh

Příloha 1:	Katalogový list epoxidové pryskyřice pro zalévání	1 list
Příloha 2:	Katalogový list trubek pro těla modulů	1 list
Příloha 3:	Kompletní výkresová dokumentace	91 listů