



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MAGNETICKÝ SEPARÁTOR PRO RECYKLACE STAVEBNÍCH A DEMOLIČNÍCH ODPADŮ

MAGNETIC SEPARATOR FOR RECYCLING CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Kovařík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Martin Kovařík
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Magnetický separátor pro recyklace stavebních a demoličních odpadů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kritická rešerše magnetických separátorů pro odstraňování feromagnetických materiálů pro využití při recyklaci stavebních a demoličních odpadů.

Konstrukční návrh magnetického separátoru pro drcený stavební odpad s feromagnetickými příměsemi pro umístění nad dopravní pás do šíře 1200 mm.

Cíle bakalářské práce:

Kritická rešerše obdobných zařízení.

Zdůvodněná koncepce navrženého řešení.

Funkční výpočet zařízení, návrh jednotlivých komponent.

Pevnostní kontrola a další výpočty hlavních komponent.

Celková sestava zařízení.

Podsestavy a výrobní výkresy vybraných konstrukčních uzlů.

Seznam doporučené literatury:

BIGOŠ Peter, Jozef KULKA, Melichar KOPAS a Martin MANTIČ. Teória a stavba zdvíhacích a dopravných zariadení. Vyd. 1. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2012. Edícia vedeckej a odbornej literatúry (Technická univerzita v Košiciach). ISBN 978-80-553-1187-6.

SHIGLEY Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-2-4-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Práce obsahuje rešerši dostupných zařízení určených k separaci feromagnetického materiálu a návrh konkrétního konstrukčního řešení magnetického separátoru pro separaci feromagnetického odpadu ze stavebních a demoličních odpadů. Dle zadaných parametrů byly provedeny výpočty potřebné ke správnému návrhu stroje. Součástí práce je výkresová dokumentace vybraných dílů a sestavy daného zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetický separátor, magnetická separace, funkční výpočty, návrh konstrukce

ABSTRACT

This work contains a search of available equipment for the separation of ferromagnetic material and the design of a specific design solution of a magnetic separator for the recycling of ferromagnetic waste from construction and demolition waste. According to the entered parameters, the calculations necessary for the correct design of the machine were performed. Part of the work is drawing documentation of selected parts and assemblies of the device.

KEYWORDS

Magnetic separator, magnetic separation, functional calculations, structural design

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOVAŘÍK, M. *Magnetický separátor pro recyklace stavebních a demoličních odpadů*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 72 s. Vedoucí diplomové práce Miroslav Škopán.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Miroslava Škopána, CSc. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2021

.....

Jméno a přímení

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Miroslavu Škopánovi, CSc. za odborné vedení, rady, poskytnutí literatury, ochotu a připomínky, které mi pomohly při vypracovávání této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během studia.

OBSAH

ÚVOD	11
1 MAGNETICKÉ SEPARÁTORY	12
1.1 VYUŽITÍ MAGNETICKÝCH SEPARÁTORŮ V PRŮMYSLU	12
1.2 PŘEHLED ZAŘÍZENÍ POUŽÍVANÝCH PRO SEPARACI	13
1.2.1 PRŮTOKOVÝ MAGNETICKÝ SEPARÁTOR	13
1.2.2 TRUBKOVÉ MAGNETICKÉ SEPARÁTORY	13
1.2.3 KASKÁDOVÉ MAGNETICKÉ SEPARÁTORY	14
1.2.4 SEPARAČNÍ ROŠTY A TYČE	15
1.2.5 SKLUZOVÉ MAGNETICKÉ SEPARÁTORY	15
1.2.6 BUBNOVÉ A VÁLCOVÉ MAGNETICKÉ SEPARÁTORY	16
1.2.7 DESKOVÉ MAGNETICKÉ SEPARÁTORY	17
1.2.8 ZÁVĚSNÝ PASOVÝ SEPARÁTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY	17
1.2.9 ZÁVĚSNÝ PÁSOVÝ SEPARÁTOR S ELEKTROMAGNETEM	18
1.3 VÝROBCI ZABÝVAJÍCÍ SE VÝROBOU ZAŘÍZENÍ URČENÝCH K SEPARACI FEROMAGNETICKÉHO MATERIÁLU	19
2 KONSTRUČNÍ ŘEŠENÍ ZÁVĚSNÝCH MAGNETICKÝCH SEPARÁTORŮ	22
2.1 RÁM	22
2.2 HNACÍ A VRATNÝ BUBEN	22
2.3 POHONNÉ A PŘEVODOVÉ ÚSTROJÍ	23
2.4 DOPRAVNÍ PÁS	25
2.5 MAGNET	26
3 KONSTRUKČNÍ A VÝPOČTOVÝ NÁVRH SEPARÁTORU	29
3.1 POUŽITÉ SOUČÁSTI	29
3.1.1 HNACÍ A VRATNÝ BUBEN	29
3.1.2 RÁM	30
3.1.3 MAGNET	31
3.1.4 DOPRAVNÍ PÁS	31
3.2 ZVOLENÉ PARAMETRY	32
3.3 TABULKOVÉ HODNOTY	33
3.4 FUNKČNÍ VÝPOČTY	33
3.4.1 OBJEMOVÝ A HMOTNOSTNÍ DOPRAVNÍ VÝKON	33
3.4.2 HLAVNÍ ODPORY	35

3.4.3	VEDLEJŠÍ ODPORY	35
3.4.4	NÁVRH POHONNÉHO A PŘEVODOVÉHO ÚSTROJÍ.....	37
3.4.5	TAHOVÉ SÍLY PŮSOBÍCÍ V PÁSU A PŘENOS OBVODOVÉ HNACÍ SÍLY	40
3.4.6	PEVNOSTNÍ KONTROLA RÁMU	43
3.4.7	PEVNOSTNÍ KONTROLA HŘÍDELE HNACÍHO BUBNU	47
3.4.8	NÁVRH A KONTROLA PERA	58
3.4.9	NÁVRH A TRVANLIVOST LOŽISEK.....	60
ZÁVĚR.....		63
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ		67
SEZNAM PŘÍLOH.....		72

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je rešerše dostupných zařízení určených k separaci feromagnetických nečistot a konstrukční návrh magnetického separátoru, který je určen pro separaci feromagnetického materiálu ze stavebních a demoličních odpadů.

Magnetické separátory, jak již název napovídá, slouží k odseparování feromagnetického materiálu od materiálu nemagnetického. K separaci se využívají dva základní druhy, a to podle použitých magnetů. Lze využít separátory s permanentními magnety, nebo v současné době méně používané elektromagnety.

Separátory jsou nedílnou součástí většiny průmyslových odvětví zabývajících se recyklací odpadů, které obsahují feromagnetické materiály (kovové odpady, stavební a demoliční odpady apod.), které mohou být díky této metodě znovu zpracovány, což je z hlediska ekologie, na kterou je v současné době kladen velký důraz, velice výhodné. Kromě recyklace se mohou magnetické separátory, v případech, kde je to vhodné užít v kombinaci s různými senzory k ochraně ostatních zařízení, před možným kontaktem s feromagnetickými předměty, které by způsobily poškození daného zařízení. Proto pracovní prostředí, ve kterém bude magnetický separátor umístěn, hraje velkou roli při výběru vhodného typu separátoru. Přehled různých druhů magnetických separátorů, a jejich funkce budou popsány v další kapitole.

Vzhledem k cílům bakalářské práce byl vybrán závěsný pásový separátor s permanentními magnety, který bude umístěn kolmo vzhledem k pásovému dopravníku. Výsledkem práce je konstrukční návrh výše zmíněného separátoru včetně funkčních výpočtů a výkresové dokumentace.

1 MAGNETICKÉ SEPARÁTORY

Magnetické separátory jsou zařízení určené primárně k zachycení feromagnetických nečistot z různých druhů materiálů. K oddělení feromagnetických částic využívají převážně účinků magnetického pole permanentních magnetů (nejčastěji se jedná o neodymové magnety, využívají se však také separátory s magnety feritovými či samariovými), případně elektromagnetů za vzniku elektromagnetického pole. Kovové nečistoty se mohou nacházet jak v sypkých směsích, kde se využívají separátory pro suché směsi, tak v tekutých nebo polotekutých směsích, a proto je potřeba dle materiálu a prostředí vybrat vhodný separátor, který spolehlivě zachytí všechny kovové nečistoty.

Magnetické separátory lze v současnosti nalézt v různých odvětvích průmyslu, kdy nejčastější použití magnetických separátorů je v recyklačním průmyslu, často se také využívají k ochraně ostatních zařízení, u kterých by mohlo při kontaktu s feromagnetickým materiálem dojít k poškození. Vedle separátorů určených k oddělení kovových materiálů existují i separátory určené k separaci neželezných kovů jako měď, hliník, stříbro atd. Tento druh separátorů ovšem není předmětem této bakalářské práce, a proto jim dále nebude věnována pozornost. [16-25]

1.1 VYUŽITÍ MAGNETICKÝCH SEPARÁTORŮ V PRŮMYSLU

Tato podkapitola se věnuje využití magnetických separátorů v různých oblastech průmyslu.

Hlavní důvody k využívání magnetických separátorů jsou:

Ochrana ostatních zařízení

- magnetické separátory v určitých vhodných případech poskytují ochranu ostatním zařízením v technologickém procesu před možným kontaktem s feromagnetickými materiály, jejichž přítomnost by mohla vést k poškození nebo destrukci celého zařízení. [17]

Recyklace odpadu

- magnetické separátory různých typů mají časté uplatnění v centrech komunálního odpadu, nebo ve specializovaných sběrnách kovového odpadu, kde se ve většině případů instalují jako součást větších separačních linek. Své uplatnění mají i ve stavebním průmyslu, pro recyklaci stavebních a demoličních odpadů, kde jsou součástí takřka všech drtičů. Díky oddělení feromagnetického materiálu od ostatního odpadu získáváme možnost materiál dále zpracovávat, což je z ekonomického i ekologického hlediska velmi výhodné. [17], [19]

Speciální účely

- jsou to například magnetické separátory pro farmaceutický, chemický nebo potravinářský průmysl, kde jsou zvýšené hygienické požadavky, proto kontakt s kovovými částicemi je extrémně nežádoucí, jak pro vstupní materiály, polotovary nebo finální výrobky. Magnetické separátory jsou zpravidla pro tyto účely osazeny neodymovým (NdFeB) magnetickým systémem. [17]

1.2 PŘEHLED ZAŘÍZENÍ POUŽÍVANÝCH PRO SEPARACI

Jak již bylo zmíněno, hlavním úkolem magnetických separátorů je separace feromagnetických materiálů od materiálů nemagnetických. Tato skutečnost platí pro všechny druhy magnetických separátorů, avšak jednotlivá zařízení se od sebe odlišují rozdílnou konstrukcí, způsobem a průběhem separačního procesu, který je pro každé zařízení specifický, kvůli funkci, kterou plní. Následující podkapitoly obsahují přehled magnetických separátorů určených pro separaci feromagnetických materiálů.

1.2.1 PRŮTOKOVÝ MAGNETICKÝ SEPARÁTOR

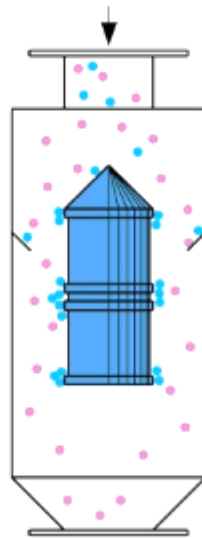
Tento typ je určen zejména k separaci feromagnetických částic, které se nacházejí v proudu tekutého nebo snadno prostupného materiálu. Základem tohoto magnetického separátoru (viz obr. 1) s ručním popř. automatickým čištěním, je soustava magnetických trubic z nerezové oceli. Takto vytvořené magnetické síto je v kontaktu s proudícím materiálem a díky velmi silným permanentním magnetům dokáže zachytit i ty nejmenší kovové nečistoty a zajistit velmi vysokou úroveň separace. Pro co nejefektivnější separaci magnetických částic je magnetický separátor do potrubního systému osazen mimořádně silnými neodymovými magnety. [20]



Obr. 1: Průtokový magnetický separátor [20]

1.2.2 TRUBKOVÉ MAGNETICKÉ SEPARÁTORY

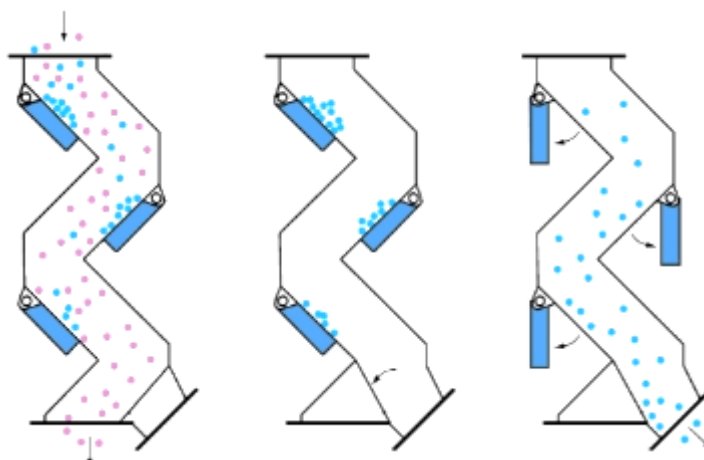
Trubkové magnetické separátory se používají pro odseparování feromagnetických nečistot z materiálových toků proudících v potrubních systémech. Používají se zejména tam, kde je možné ruční čištění magnetického jádra po jeho zanesení. V potrubí se montují buď doprostřed, nebo na konec potrubí. Trubkové magnety jsou konstruovány tak, že permanentní magnetické jádro je v cestě proudící surovině (viz obr. 2), která jej obtéká, takže potrubím může proudit jen suchý, granulovaný materiál s dostatečně malými rozměry, aby se zabránilo ucpávání separátoru. Trubkové separátory nejsou vhodné pro vlhké a olejnaté materiály, z důvodu možného ucpávání separátoru feromagnetickými částicemi. Jsou dodávány v provedení s feritovými nebo neodymovými magnetickými jádry. Trubkové separátory je možné využít na separaci feromagnetických částic z chemikálií, plastů, krmiv, osiv, potravinářských či farmaceutických látek. [18]



Obr. 2: Trubkový magnetický separátor [18]

1.2.3 KASKÁDOVÉ MAGNETICKÉ SEPARÁTORY

Kaskádové separátory se používají zejména tam, kde je zapotřebí separovat nežádoucí feromagnetické částice z velkého množství sypkých materiálů, jako jsou obilná zrna, krmné směsi nebo kakaové boby. Jsou určeny pro vertikální dopravní cesty. Konstrukce tohoto separátoru se skládá z permanentních magnetů, které jsou kaskádově přichyceny na vnější straně lomeného potrubí ve dvou, nebo třech stupních (viz obr. 3). Tím je dosažen vysoký stupeň separace. Zachycené nečistoty lze odstraňovat ručně, nebo s pomocí elektro-pneumatických systémů s možností automatického řízení. Pro ulehčení ručního čištění, od zachycených kovových částí je možné do výstupu zařadit záklopku. Po otevření záklopky se uzavře výstup s vyčištěným materiálem a přichycené kovové nečistoty mohou po odklopení permanentních magnetů volně odejít do předem připraveného sběrného systému (obr. 3). [18], [20]



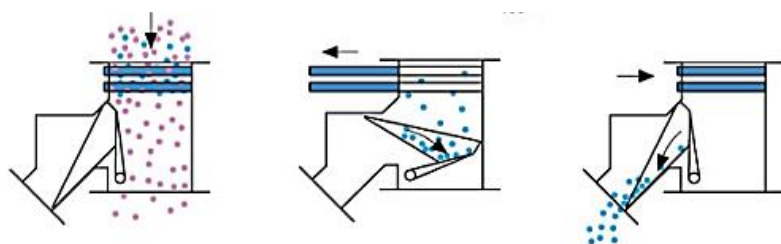
Obr. 3: Kaskádový magnetický separátor [18]

1.2.4 SEPARAČNÍ ROŠTY A TYČE

SeparáčnÍ rošty a tyče se řadí mezi vysoce výkonné systémy určené pro separaci. Využívají se k oddělení velmi jemných feromagnetických částic ze sypkého materiálového toku. Jsou schopny zachytit i částečně magnetické kovové částice (např. slabě magnetickou nerezovou ocel). Umísťují se do potrubí, násypek a skluzů. Magnetické rošty mají široký rozsah použití v potravinářském, plastikářském, chemickém, farmaceutickém či zemědělském průmyslu. [18], [20]

Rošt se skládá z jednotlivých tyčí (viz obr. 5), které mohou být tvořeny buď feritovým magnetickým systémem (použití do maximální teploty 150 °C) nebo silnějším neodýmovým magnetickým systémem (do 90 °C). Pro dosažení vyšší odolnosti separátoru proti korozi, mechanickým poškozením a snadnější údržbě jsou magnetické tyče vloženy do pouzder z nerezové oceli. V některých průmyslech, jako je potravinářský, nebo chemický, mohou být přísnější požadavky na hygienu, z tohoto důvodu může být obal tyčí vyroben z nerezavějící oceli 1.4404, jejichž povrch je navíc speciálně upraven, tzv. elektrolytickým leštěním. [18]

Výhodou tohoto typu magnetického separátoru je vysoká efektivita, bezúdržbovost, nízké pořizovací i provozní náklady, snadné použití a jednoduchá montáž. Čištění separátoru lze provést jednoduše vysunutím permanentních magnetů z nerezových trubice, ze kterých následně zachycené kovové nečistoty samovolně odpadnou (obr. 4). [20]



Obr. 4: Schéma čistění separačního roštu [21]



Obr. 5: Roštový separátor [20]

1.2.5 SKLUZOVÉ MAGNETICKÉ SEPARÁTORY

Používají se k odstraňování feromagnetických částic z prašných, olejnatých nebo lepkavých materiálů. Hlavní výhodou je jejich schopnost odstraňovat nežádoucí magnetické nečistoty z materiálových toků obsahujících větší částice, které by mohly způsobit ucpání potrubí. Konstrukce je vyrobena z nerezavějící oceli. Magnety jsou umístěny z vnější části proti sobě a nepřicházejí do styku s materiálem (viz obr. 6). Po jejich otevření a oddělení nemagnetické části, železné částice samovolně odpadnou. Skluzové separátory je možné instalovat v různých polohách. Je možné je instalovat i do potrubí, kde dochází k přepravě materiálu pod tlakem. [18]



Obr. 6: Skluzový magnetický separátor [18]

1.2.6 BUBNOVÉ A VÁLCOVÉ MAGNETICKÉ SEPARÁTORY

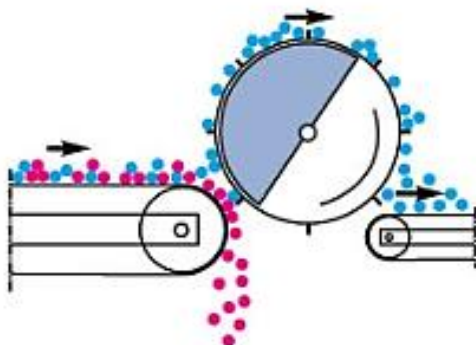
Bubnové a válcové separátory slouží k nepřetržité a automatické separaci feromagnetických nečistot z velkého množství sypkých hmot. Bubnové separátory jsou zařízení, která mohou být používána pro mokré i suché procesy magnetické separace. Jejich konstrukce umožňuje zachytávat drobné i velké kusy magnetického kovového materiálu. Oba druhy se používají hlavně při zpracování komunálního odpadu, zpracování plastů a dřeva a současně se používají jako ochrana před poškozením strojírenských zařízení (např. lisy, drtiče, mlýny, trhačky). Jejich výhodou je přímý kontakt separovaného materiálu se separátorem a automatická separace. [18], [20]

Srdcem magnetického bubnu a válce je sestava magnetických jader ve tvaru půlměsíce, kolem níž se otáčí vnější část bubnu (z nerezové oceli) s lištovými unašeči. Kovové magnetické příměsi se zachytávají na povrch bubnu nebo válce a odpadávají až za osou bubnu do přichystané sběrné nádoby, kde díky půlměsíčovému tvaru magnetického jádra magnetické pole přestává účinkovat. Mohou být osazeny feritovými magnety, které zaručují časově téměř neomezenou životnost. V případě požadavku na vyšší magnetickou sílu, se jádra osazují extrémně výkonnými neodymovými (NdFeB) magnety. [20]

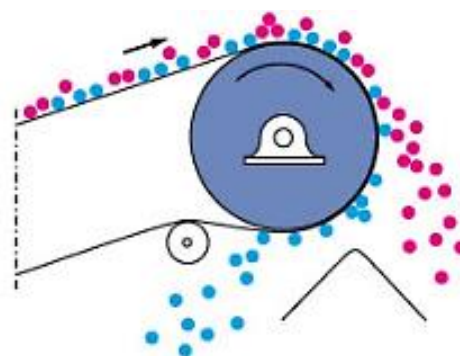
Největší rozdíl mezi magnetickým bubnem a válcem je způsob jejich umístění. Magnetický buben (obr. 7) lze umístit pod pásový dopravník nebo násypku, ale může být také vsazen do skříňové konstrukce, jejíž spodní část tvoří dvě výsyvky. Magnetické válce (obr. 8) se obvykle začleňují do pásového dopravníku, kde na konci dopravního pásu nahrazují hnací buben. [18], [20]

Rozlišujeme tři základní typy bubnových magnetických separátorů [18]:

- **Bubnové magnety:** magnetický systém se skládá z magnetického sektoru s úhlem 180° , kolem kterého se otáčí buben z nerezavějící oceli. Nasazují se obvykle za dopravníkové pásy.
- **Bubnové magnety s krytováním:** bubnové magnety jsou umístěné v krytu, s pohonem a výstupy na surovinu a odseparované feromagnetické nečistoty. Instalují se za dopravníkové pásy, potrubní systémy, skluzy apod.
- **Magnetické hnací válce:** magnetický systém je z plného magnetického sektoru s úhlem 360° . Používají se místo vratných bubnů pásových dopravníků.



Obr. 7: Bubnový magnetický separátor [21]

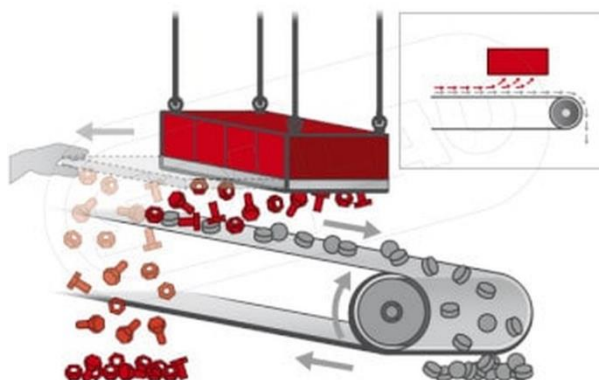


Obr. 8: Válcový magnetický separátor [21]

1.2.7 DESKOVÉ MAGNETICKÉ SEPARÁTORY

Deskové magnety jsou jednoduchým a nenáročným řešením separace feromagnetických částic z materiálů přepravovaných na pásovém dopravníku. Tento způsob se používá hlavně tam, kde je menší výskyt feromagnetických příměsí. Lze je využít například v zemědělském a potravinářském průmyslu nebo v průmyslu zabývajícím se zpracováním dřeva a kamene. [18]

Deskové magnety (obr. 9) jsou zavěšeny nad pásovým dopravníkem a magnetické částice obsažené v dopravovaném materiálu se přichytávají na spodní magnetickou stranu desky (obvykle osazenou permanentními feritovými magnety, nebo extrémně silnými neodymovými magnety). Přichycené magnetické nečistoty se pak z desky odstraňují ručně nebo při vyšším výskytu nečistot se využívá automatické čištění. [17], [18]



Obr. 9: Deskový magnetický separátor [20]

1.2.8 ZÁVĚSNÝ PASOVÝ SEPARÁTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY

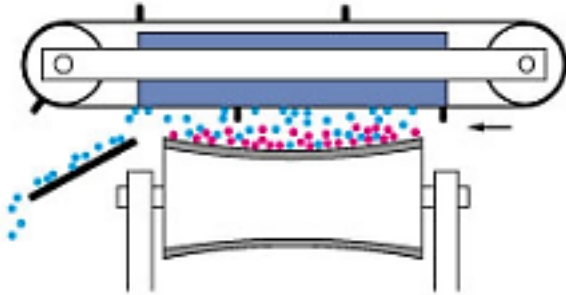
Tento typ magnetického separátoru v angličtině nazvaný „Overbelt Overband Magnetic Separator“ se používá v provozech s vysokým výskytem feromagnetických nečistot, kde by byla magnetická deska s manuálním čištěním kvůli rychlému zanášení nepoužitelná a neefektivní. Jsou určeny hlavně pro nasazení v odpadovém hospodářství při zpracování komunálního odpadu, zpracování plastů, dřeva, těžebním a stavebním průmyslu. [18], [20]

Tento speciální magnetický separátor slouží k zachycování kovových surovin (určených pro další zpracování) a chrání strojní zařízení (drtiče, lisy, šnekové dopravníky atd.) před železnými předměty větších rozměrů (odlomené díly strojů, šrouby, matice, dráty atd.). Feromagnetické nečistoty odseparované z materiálu jsou vynášeny pomocí dopravníkového pásu pryč k dalšímu zpracování či kumulaci. [18], [20]

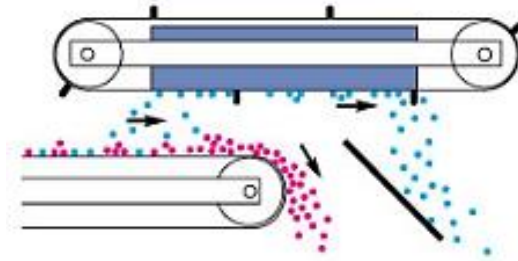
Závěsný pásový separátor s permanentním magnetem se ve většině případů zavěšuje příčně nad pásový dopravník (obr. 10), po kterém je přepravován materiál určený k separaci, nicméně je možno jej v místě přesypu nainstalovat i paralelně s pásem (obr. 11). Od způsobu zavěšení separátoru se odvíjí i druh použitých magnetů. Při podélné instalaci je možnost magnetický separátor osadit slabšími magnety. Naopak při příčném zavěšení separátoru se doporučuje použití silnějších neodymových magnetů, jelikož na dopravníkovém pásu se může nacházet vyšší a kompaktnější vrstva materiálu. Pásový separátor zachycené nečistoty vynáší do sběrné nádoby nebo na jiný dopravní systém. [17], [18]

Magnetická síla, kterou vytváří soustava extrémně výkonných permanentních magnetů, nepropustí žádné nežádoucí kovové částice. Proto je využitelnost těchto magnetických

separátorů prakticky neomezená. Tyto separátory postupně nahrazují starší elektromagnetické separátory, protože dosahují vyšší účinnosti a úspornosti. [18], [20]



Obr. 10: Závěsný pásový magnetický separátor zavěšený kolmo nad pásovým dopravníkem [21]



Obr. 11: Závěsný pásový magnetický separátor zavěšený rovnoběžně nad pásovým dopravníkem [21]

1.2.9 ZÁVĚSNÝ PÁSOVÝ SEPARÁTOR S ELEKTROMAGNETEM

Závěsný pásový separátor s elektromagnetem (obr. 12) se používá pro větší průmyslové separace z materiálových toků se silnými vrstvami, jako je uhlí, vápenec, písek a další. Je vhodný pro intenzivní a náročnou separaci těžkých kovových kusů o větších tloušťkách. Separace pomocí elektromagnetu závisí na velikosti cívek, které dokážou generovat velmi silné magnetické pole. Vlivem magnetického pole jsou feromagnetické nečistoty zachyceny a odloučeny od zbývajícího materiálu. Elektromagnet využívá kruhové hliníkové nebo měděné vodiče k vytvoření silného elektromagnetického pole. Tyto vodiče jsou chlazené olejem nebo vzduchem. Nevýhody tohoto separátoru jsou vyšší spotřeba elektrické energie a vyšší hmotnost oproti separátorům s permanentními magnety. [26], [27]



Obr. 12: Závěsný pásový separátor s elektromagnetem [27]

1.3 VÝROBCI ZABÝVAJÍCÍ SE VÝROBOU ZAŘÍZENÍ URČENÝCH K SEPARACI FEROMAGNETICKÉHO MATERIÁLU

Účelem této podkapitoly je ukázka vybraných firem věnujících se výrobě magnetických separátorů a některých jejich zařízení, určených do všech odvětví průmyslu, které byly inspirací pro tvorbu této bakalářské práce. Tato podkapitola má pouze informovat a poukázat na část firem věnující se výrobě a distribuci separátorů v České republice. Podkapitola je také doplněna o několik prodejců ze zahraničí.

Výrobci:

SOLLAU s.r.o.

Sollau je Česká firma sídlící ve Velkém Ořechově zabývající se vývojem, výrobou a aplikací zařízení pro magnetickou separaci (obr. 13 a 14). Na Českém trhu se nachází už deset let. Zařízení této firmy lze uplatnit téměř ve všech odvětvích průmyslu. Součástí jejich výroby jsou separátory pro mokré i suché směsi, třídící linky, odmagnetovače atd. Svá zařízení vyváží do 60 zemí v Evropě. [20]

- oblast: Česká Republika
- webová adresa: <https://www.sollau.cz/>



Obr. 13: Závěsný pásový separátor od firmy Sollau [20]



Obr. 14: Deskový magnetický separátor od firmy Sollau [20]

WAMAG, spol. s r.o.

Wamag je Česká firma sídlící v Mníšku pod Brdy. Funguje již od roku 1994 a v současné době je partnerem mezinárodní skupiny Goudsmit Magnetics Group. Zabývá se výrobou zařízení určených pro separaci, filtraci a magnetickou manipulaci (viz obr. 15 a 16). Jejich zařízení nacházejí uplatnění prakticky ve všech odvětvích průmyslu. Jejich zařízení se používají ve 35 zemích po celém světě. [17]

- oblast: Česká Republika, střední a východní Evropa
- webová adresa: <https://www.wamag.cz/>



Obr. 15: Bubnový magnetický separátor od firmy Wamag [17]



Obr. 16: Trubkový magnetický separátor od firmy Wamag [17]

STEINERT

Steinert je firma s dceřinými společnostmi v USA, Austrálii a Brazílii. Tato společnost se převážně zaměřuje na recyklaci kovů, domácích odpadů, plastů a dalších druhů odpadů. Kromě recyklace se zabývá výrobou závěsných magnetických separátorů (obr. 17) a senzorů určených pro třídící systémy. [19]

- oblast: Německo
- webová adresa: <https://steinertglobal.com/>



Obr. 17: Závěsný pásový magnetický separátor od firmy Steinert [19]



Obr. 18: Válcový magnetický separátor od firmy Steinert [19]

MAGSY

Magsy je Česká firma sídlící ve Frýštáku s pobočkami v několika Evropských zemích. Zabývá se výrobou magnetů pro domácí i průmyslové využití a magnetických separátorů určených pro suché a mokré směsi (obr. 19 a 20). [24]

- oblast: Česká Republika
- webová adresa: <https://www.magsy.cz/>



Obr. 19: Roštový separátor od firmy Magsy [24]



Obr. 20: Válcový magnetický separátor od firmy Magsy [24]

COGELME

Cogelme je Italská firma zabývající se vývojem a výrobou vysoce výkonných zařízení určených pro recyklační průmysl. Zařízení této společnosti lze nalézt v různých zemích po celém světě. Mezi jejich produkty patří drtiče, závěsné magnetické separátory s permanentními magnety nebo elektromagnety (obr. 21). [25]

- oblast: Itálie
- webová adresa: <https://www.cogelme.eu/>



Obr. 21: Závěsný pásový separátor od firmy Cogelme [25]

2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ZÁVĚSNÝCH MAGNETICKÝCH SEPARÁTORŮ

Z výše zmíněných magnetických separátorů byl pro tuto bakalářskou práci zvolen závěsný pásový separátor s permanentními magnety. Tento typ magnetického separátoru byl zvolen, protože ze všech zmíněných separátorů z hlediska funkce i konstrukce nejlépe vyhovuje využití ve stavebnictví, kde dle zadání bude použit k separaci feromagnetických částic ze stavebních a demoličních odpadů. Dalším důvodem pro jeho výběr je jeho velká účinnost, úspornost a schopnost oddělovat nežádoucí feromagnetický odpad (zejména ocelové výztuže z drcených železobetonů) o větších rozměrech a hmotnosti. Separátor bude zavěšen pomocí závěsných ok kolmo nad pásovým dopravníkem s dopravovaným odpadem a nepřetržitým provozem. Odseparovaný odpad poté bude odlučován do předem připravené sběrné nádoby.

Součástí této kapitoly je také popis konstrukce a uspořádání jednotlivých částí, které jsou nedílnou součástí závěsného pásového separátoru s permanentními magnety.

2.1 RÁM

Pro konstrukci rámu závěsného pásového separátoru se nejčastěji používají tyče průřezu U z ocelí tříd 10 a 11 válcované za tepla, což je patrné i z obrázků od jednotlivých výrobců. Konstrukce z tyčí průřezu U jsou cenově výhodné a z hlediska výroby poměrně jednoduché. Ke spojení jednotlivých částí rámu dochází pomocí svařování, a proto je na materiál kladen požadavek na dobrou obrobitelnost a svařitelnost spojovaných součástí. Zmíněným požadavkům nejlépe vyhovuje ocel 11 375, která bude využita pro konstrukci rámu tohoto magnetického separátoru. Konstrukce a návrh rámu bude detailněji popsána ve třetí kapitole.

2.2 HNACÍ A VRATNÝ BUBEN

Magnetický separátor dále obsahuje hnací a vratný buben. Vzhledem k tomu, že magnetické separátory i pásové dopravníky mají prakticky stejné uspořádání hnacích a vratných bubnů, lze použít hnací a vratný buben určený pro pásové dopravníky. Hnací buben je poháněn elektromotorem přes převodové ústrojí a nejčastěji se nachází na straně separátoru, kde dochází k přepadávání odseparovaného materiálu. Vratný buben je upevněn na opačné straně rámu, a zajišťuje vracení pásu a také jeho napínání, které je realizováno pomocí napínacích šroubů. [3]

Bubny pásových dopravníků se vyrábějí buď jako lité, nebo svařované. Otvorem v bubnu prochází hřídel. Hřídel může být uvnitř bubnu přivařena k výztuhám, což způsobuje teplotní ovlivnění obou součástí. Vlivem teploty dochází ke vzniku lokálního napětí a to může vést k deformaci zmíněných součástí. Rovněž přivaření hřídele k bubnu zabraňuje jeho zaměnitelnosti při poškození, což je podle mého názoru nevýhodou, která je ovšem kompenzovaná nižší cenou výroby. Hřídel může být také upevněna k bubnu přes upínací pouzdro, které je určeno pro přenos malých a středních točivých momentů. Výhodou je jejich snadná montáž a demontáž, ale tento způsob uchycení výrobu o něco prodražuje. [3], [7]

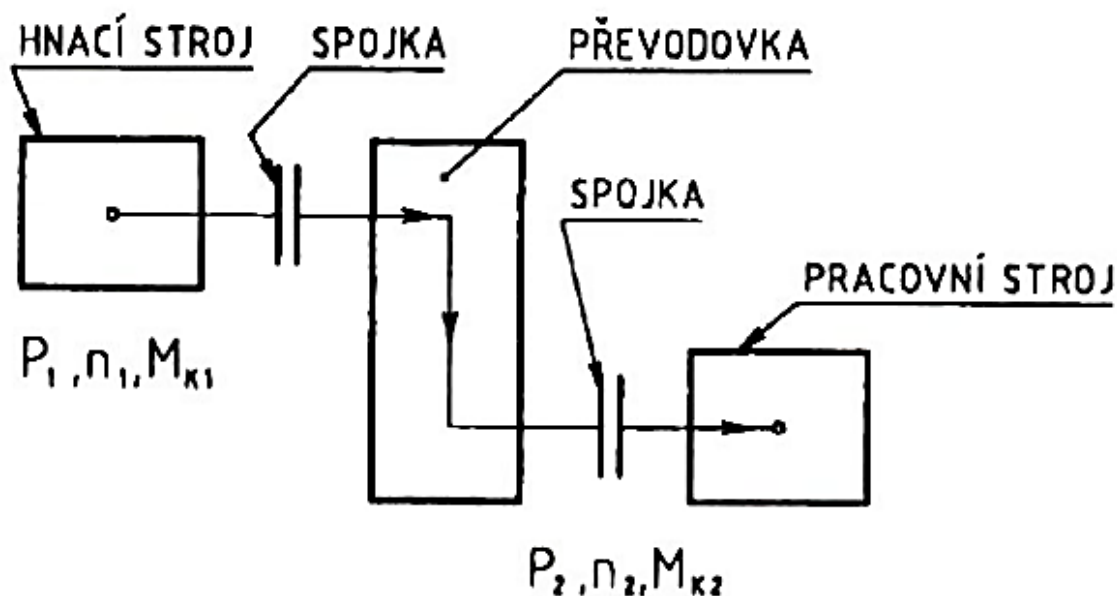
Povrch pláště bubnu bývá rovný, rovný s konickými konci nebo mírně bombírován pro lepší vedení pásu. Hnací bubny musí zabezpečit přenos velkých obvodových sil na pás. Proto bývá pro přenos vyšších výkonů za účelem zvětšení součinitele smykového tření jejich povrch pogumován a případně i opatřen vzorkem. Hnací a vratný buben bude zvolen ve třetí kapitole. [3]

2.3 POHONNÉ A PŘEVODOVÉ ÚSTROJÍ

Kromě velice podobného uspořádání hnacího a vratného bubnu je dalším společným znakem magnetických separátorů a pásových dopravníků jejich pohonné a převodové ústrojí. Podobně jako u většiny pásových dopravníků, tvoří základ pohonného ústrojí magnetického separátoru standardní asynchronní elektromotor napájený z elektrické sítě, generující točivý moment, který se přes hřídel přenáší na hnací buben.

Převody tvoří spojovací článek mezi částmi strojů. Přenášejí a případně rozdělují energii přiváděnou z hnacího stroje na hnaný stroj. Hlavním důvodem, pro který se převody používají, jako spojovací články ve strojních zařízeních je, že rychlosti, potřebné pro funkci pracovního stroje obvykle nesouhlasí s rychlostmi stroje hnacího. Je-li převod otáčkové frekvence do pomala, mluvíme o reduktorech, převádí-li se otáčková frekvence do rychla, jedná se o multiplikátory. Převodovky obecně slouží k redukci otáček při současném zvyšování točivého momentu. Nejrozšířenější jsou převody mechanické. [5, str. 159]

Mechanické převody (obr. 22) se používají při přenosu točivého momentu z hnacího hřídele na hnaný. Točivý pohyb se přenáší tak, že dochází ke změně frekvence otáček, a tím i ke změně kroutícího momentu. Přenášený výkon se teoreticky nemění. Ve skutečnosti se zmenší o ztráty převodu. Výkon P_1 na vstupu převodu a P_2 na výstupu patří k základním parametrům převodu a jejich poměr vyjadřuje jeho účinnost. [5, str. 159]

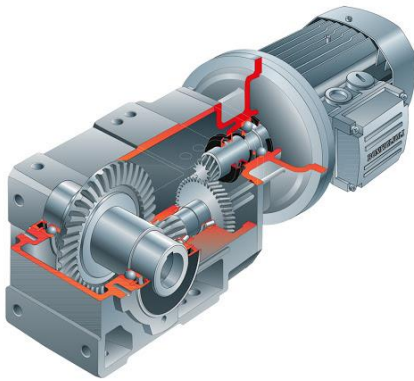


Obr. 22: Blokové schéma převodu od motoru na pracovní stroj [5]

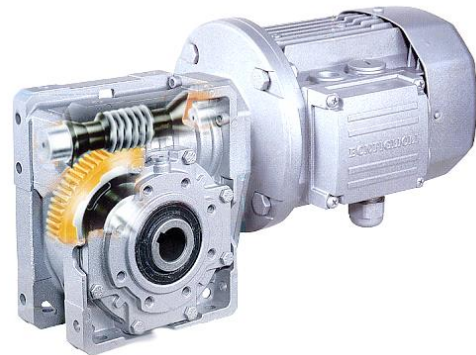
U mechanických převodů se k přenosu sil a pohybů z hřídele hnacího na hřídel hnaný používá kol, která jsou spojena buď přímo (přímé, kontaktní spojení), nebo nepřímo (ohebným členem). Spojení v obou případech může být třecí (silové) nebo tvarové. [5, str. 159]

V současné době existuje několik možných způsobů řešení pohonu magnetických separátorů i pásových dopravníků. Pro všechny koncepce bez rozdílu je vyžadován plynulý a nepřetržitý provoz.

První způsob pohonu separátorů a pásových dopravníků se skládá většinou z elektromotoru, převodové skříně, spojek a brzdy. Tento způsob uspořádání je umístěn u hnacího bubnu a spojen s jeho hnací hřídelí. Tyto pohony se od sebe dále odlišují druhem použitých převodovek. Jako první bych uvedl kuželočelní převodovky. Kuželočelní převodovky (obr. 23) jsou úhlové převodovky, kde vstupní a výstupní hřídele svírají 90° úhel. Díky tomu se dá docílit výhodného prostorového uspořádání. Katalog firmy NORD [33] uvádí, že největší výhodou kuželočelních převodovek je prakticky konstantní účinnost v celém rozsahu dodávaných převodových poměrů. Další možností k přenosu točivého momentu je využití šnekové převodovky s čelním předstupněm. Šnekové převodovky (obr. 24) s čelním předstupněm jsou úhlové převodovky, kde vstupní a výstupní hřídele svírají 90° úhel. Stejně jako v předchozím případě můžeme v katalogu firmy NORD [33] zjistit, že šnekové převodovky s čelním předstupněm dosahují účinnosti až 92 %, zaručují minimální hlučnost a dlouhou životnost.

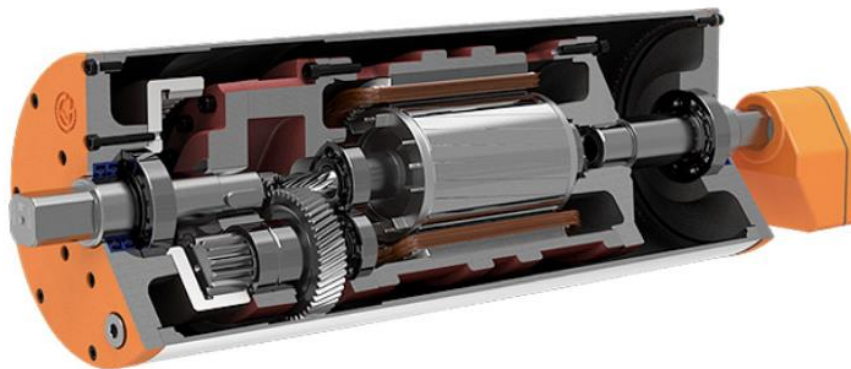


Obr. 23: Řez kuželočelní převodovkou [29]



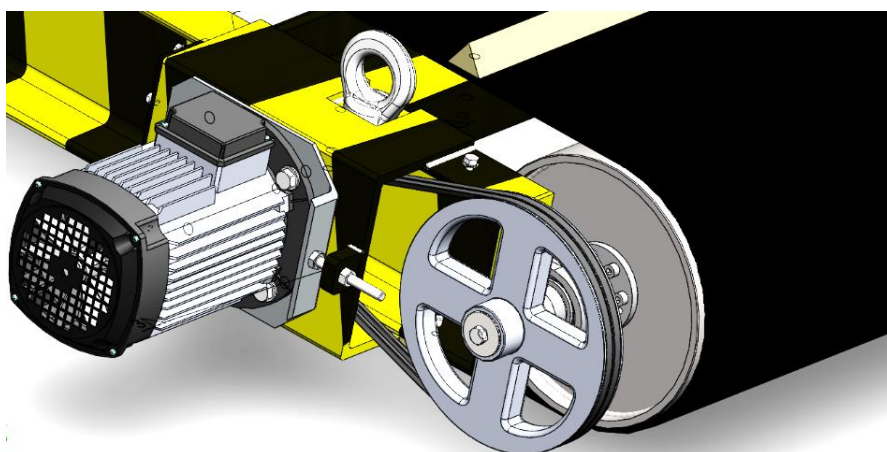
Obr. 24: Řez šnekovou převodovkou [29]

Druhá možnost jak pohánět magnetický separátor je spojení pohonného a převodového ústrojí s hnacím bubnem do jednoho celku tzv. elektrobubnu (viz obr. 25). Elektrobubny se využívají zejména tehdy, pokud konstrukce a prostředí, ve kterém má být separátor umístěn nedovoluje použití výše zmíněných koncepcí pohonu např. z důvodu nedostatku pracovního prostoru. Pořízení tohoto zařízení je ovšem finančně náročnější. [28]



Obr. 25: Řez elektrobubnem [28]

Jako poslední způsob pohonu bych uvedl pohon pomocí řemenového převodu (viz obr. 26), který patří ze všech zmíněných variant pohonů k nejlevnějším. Jedná se o převod se silovým stykem. Krouticí moment je v tomto případě přenášen ohebným členem tj. řemenem z hnacího hřídele na hnaný. Řemen je opásán přes řemenice, které jsou upevněny na hřídelích. Řemenové převody se používají zejména pro přenos malých a středních výkonů na rovnoběžné hřídele. K přednostem patří nízké výrobní náklady, tichý chod, neboť řemen svou pružností, popř. prokluzem tlumí rázy. Prokluz při přetížení má také funkci pojistky. Řemenové převody nevyžadují přesnou výrobu ani pečlivou montáž a snadno se udržují. K nedostatkům patří větší rozměry převodů, nepřesnost převodu vyplývající z třecí vazby, větší zatížení hřídelů a ložisek vlivem nutného předpětí řemene. [5, str. 160]



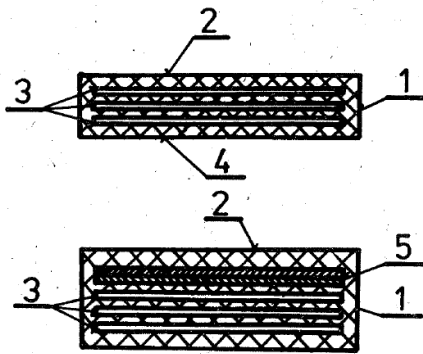
Obr. 26: Řemenový pohon

Pro pohon svého magnetického separátoru volím standartní asynchronní elektromotor se šnekovou převodovkou, jehož parametry budou specifikovány ve třetí kapitole.

2.4 DOPRAVNÍ PÁS

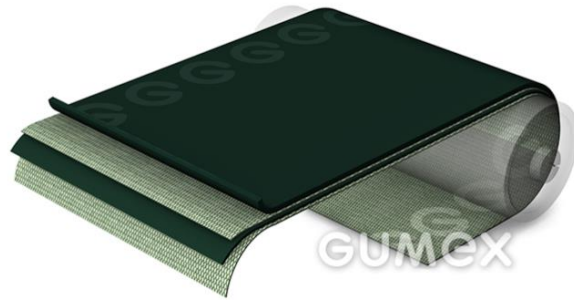
Dopravní pás je opásán kolem hnacího a vratného bubnu závěsného magnetického separátoru. Dopravní pásy (viz obr. 27 a 28) se skládají z nosné kostry tvořené textilními vložkami z bavlny, polyamidu, případně z jejich kombinací oboustranně chráněné gumovými krycími vrstvami a gumovými ochrannými okraji. Textilní vložky jsou vzájemně spojené tenkými vrstvami z měkké pryže. Horní krycí vrstva má za účel chránit textilní kostru před abrazivními účinky materiálu, atmosférickými vlivy a případným jiným mechanickým poškozením, dolní krycí vrstva ji chrání před abrazivními účinky nosných válečků a bubnů. Tloušťka horní krycí vrstvy bývá zpravidla 1,5 až 5 mm, dolní 1,5 až 2 mm, bočních ochranných okrajů 5 až 20 mm – podle dopravovaného materiálu. Podle konstrukce mohou být pásy:

- kryté, jejichž textilní kostra je kryta ochrannými vrstvami gumy ze všech stran
- řezané, vybavené pouze horní a dolní vrstvou gumy
- nekryté, bez ochranných vrstev měkké gumy



- 1 .. boční ochranný okraj
- 2 .. horní krycí vrstva
- 3 .. pogumované textilní vložky
- 4 .. dolní krycí vrstva
- 5 .. ochranné vložky z pogumované tkaniny

Obr. 27: Průřez dopravního pásu [3]



Obr. 28: Dopravní pás od firmy Gumex [8]

Dopravní pásy se vyrábí celistvé a nespojené. Celistvé pásy se již při výrobě spojují vulkanizací na předepsanou délku, tj. na délku vnitřního obvodu pásu. Nespojené pásy mají oba konce volné, a k jejich spojení dochází dodatečně buď vulkanizací za studena, za tepla nebo mechanicky. Dopravní pásy se běžně vyrábějí v normalizovaných šířkách 400, 500, 650, 800, 1000, 1200, 1400, 1800, 2000, 2200, 2400 mm. Dopravní pás bude zvolen ve třetí kapitole. [3, str. 135]

2.5 MAGNET

Magnety patří mezi hlavní součásti magnetického separátoru. Bez magnetického pole, které jsou tyto magnety schopny generovat, by pro separátory bylo nemožné dosáhnout oddělení feromagnetických částic od nemagnetických. V současné době se magnetické separátory osazují převážně magnetickým systémem s permanentními magnety, které se vyznačují vyšší účinností, a proto postupně nahrazují starší a méně efektivní elektromagnetické systémy.

Permanentní magnety můžeme podle použitých materiálů na jejich výrobu dělit na:

Feritové magnety

Feritové magnety obsahují přibližně 80% oxidu železa a 20% oxidu Baria ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$), nebo Stroncina ($\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$). Vzhledem k tomu, že tyto suroviny jsou dostupné ve velkém množství, patří tyto magnety mezi cenově nejdostupnější a nejpoužívanější. Feritové magnety jsou tvrdé, křehké a choulostivé na rozbití. Opracování se nejčastěji vykonává broušením za pomoci diamantových nástrojů. Novou technikou opracování je dělení vodním paprskem. Feritové magnety jsou odolné vůči vlivům počasí a neoxidují. Nejsou citlivé na odmagnetizování a za normálních podmínek si udržují permanentní magnetismus. Jsou odolné vůči většině chemikálií a rozpouštědel. Rozsah pracovních teplot je od -40°C do $+250^\circ\text{C}$. [13], [14]

Feritové magnety se liší do požadovaných tvarů. Při výrobě izotropních feritů se využívá tzv. suchá cesta, zatím co anizotropní ferity se vyrábějí mokrou cestou. Izotropní magnety mají ve všech směrech stejné magnetické hodnoty. Magnetizace probíhá ve všech směrech. Anizotropní magnety jsou lisované v magnetickém poli a zachovávají si směr magnetizace. Konečný tvar a pevnost dostávají permanentní magnety výpalem (sintrováním) při teplotách přes 1200 °C. [13]

Feritové magnety mají velmi širokou možnost využití. Uplatňují se jako přídržné magnety v průmyslovém, kancelářském i domácím provedení. [13]

AlNiCo magnety

AlNiCo magnety jsou vytvořeny ze směsi hliníku, niklu, kobaltu, železa, mědi a titanu. Vyrábějí se sléváním nebo spékáním. Jsou dodávány pouze v anizotropním provedení, takže jsou magnetizované výlučně v jednom směru. Mají vysokou remanenci (zbytková magnetizace přetrvávající po odstranění magnetizujícího pole), avšak malou koerцитivitu. To určuje velkou délku magnetizačního směru. Optimální poměr průměru magnetu k jeho délce je 1:4. Magnetické pole AlNiCo magnetů může být vlivem demagnetizace oslabené.

AlNiCo je tvrdý materiál a opracovává se pouze broušením. Provozní teplota je od -270°C do +500°C. Vyznačují se vysokou odolností vůči kyselinám a rozpouštědlům. [14]

Samarium-kobaltové magnety

Samarium-kobaltové magnety jsou druhým nejsilnějším typem permanentních magnetů po neodymech. Patří také k magnetickým vzácným zeminám (lantanoidy). Hlavní složku tvoří Samarium (Sm) a Kobalt (Co). Tyto dvě hlavní složky mohou být v poměru 1:5 (SmCo5), nebo 2:17 (Sm2Co17). Poměr těchto dvou složek poté určuje jejich výsledné magnetické vlastnosti a maximální pracovní teplotu.

Výroba se skládá z lisování v magnetickém poli a následného spékání. SmCo je křehký a tvrdý materiál. Na rozdíl od feritových nebo AlNiCo magnetů mohou být SmCo magnety vyráběny s menšími rozměry.

Jsou dodávány pouze v anizotropním provedení, to znamená, že jsou magnetizované výlučně v jednom směru. Tyto magnety jsou velmi odolné vůči působení demagnetizačního pole. Nevýhodou SmCo magnetů je vysoký obsah kobaltu, což značně prodražuje konečnou cenu magnetu. Proto se využívají hlavně v aplikacích, kde je potřebné nasadit miniaturní magnet s vysokou energií a zároveň je v tomto prostředí vysoká teplota. Provozní teplota je do +250°C (SmCo5) a +300°C (Sm2Co17). Nejsou odolné vůči anorganickým kyselinám a rozpouštědlům. [14]

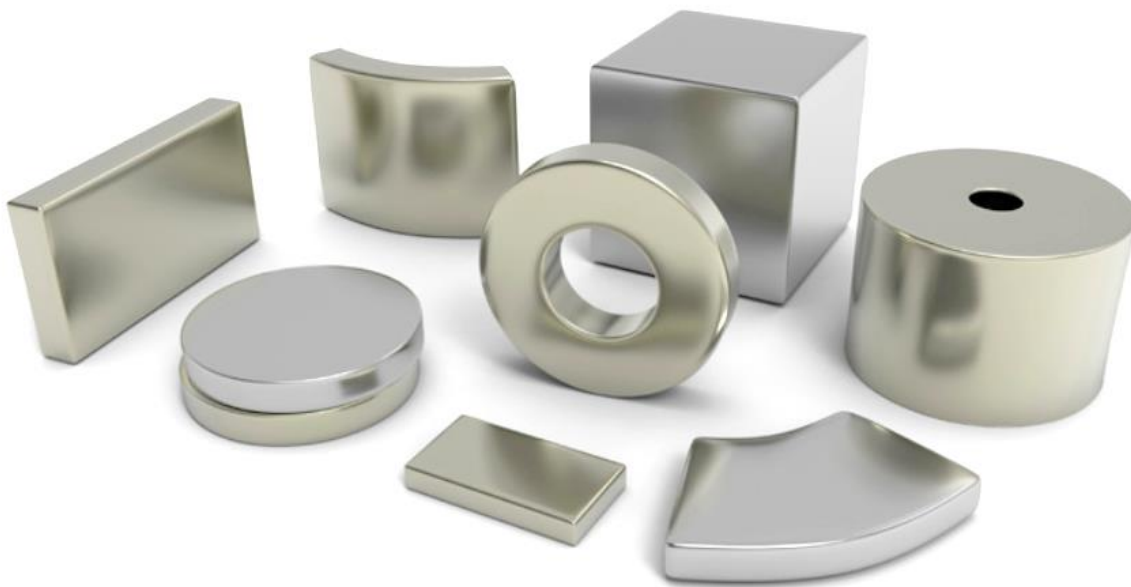
Neodymové magnety

Neodymové magnety jsou v současnosti nejsilnějším typem magnetů s vynikajícími magnetickými vlastnostmi. Patří do skupiny magnetů založených na bázi vzácných zemin (Lanthanoidy). Jejich hlavní složkou je Železo s příměsí Neodymu (Nd) a Boru (B). Dalšími

prvky, které se přidávají do finální slitiny, jsou hlavně Kobalt (Co) a Dysprosium (Dy), které slouží k vylepšení magnetických vlastností a teplotní odolnosti magnetů. [14], [30]

Neodymové magnety lze vyrábět v různých tvarech např. válce, hranoly, prstence, tyče nebo koule (viz obr. 29). Vyrábějí se lisováním v magnetickém poli a následným spékáním. Při vysoké vlhkosti vzduchu oxidují, a proto se v závěrečné fázi výroby galvanizují (nejčastěji zinkem nebo niklem). Proto jsou vzhledově velmi lesklé a hladké. Další možnosti povrchových úprav jsou například pozlacení, chromování, epoxidace, pasivace a mezi nejnovější technologie patří povlakování Hliníkem a nitridem Titánu. Neodymové magnety jsou dodávány nejčastěji v anizotropním provedení. Provozní teplota je max. +60 až +240°C podle třídy materiálu. [14]

Neodymové magnety jsou tvrdé, křehké a choulostivé na rozbití. Opracování je velmi problematické, protože je při něm nutné porušit ochrannou galvanickou vrstvu. Neodymy je možné opracovat broušením pomocí diamantových nástrojů, avšak hned po opracování je nutné vytvořit novou ochrannou vrstvu. Neodymové magnety výborně odolávají vnějším demagnetizačním vlivům a za normálních podmínek si udržují permanentní magnetizmus. [14], [30]



Obr. 29: Neodymové magnety se zinkovou povrchovou úpravou [30]

3 KONSTRUKČNÍ A VÝPOČTOVÝ NÁVRH SEPARÁTORU

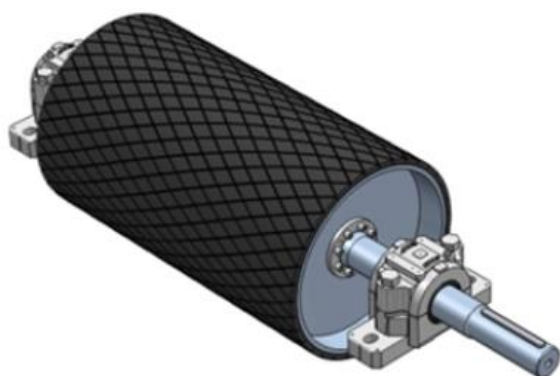
Tato kapitola obsahuje volbu použitých součástí pro závěsný pásový separátor a jejich technické parametry, materiály a konkrétní výrobce. Jejím obsahem jsou také vzorce, schémata a výpočty, které byly nutné pro konstrukční návrh stroje.

3.1 POUŽITÉ SOUČÁSTI

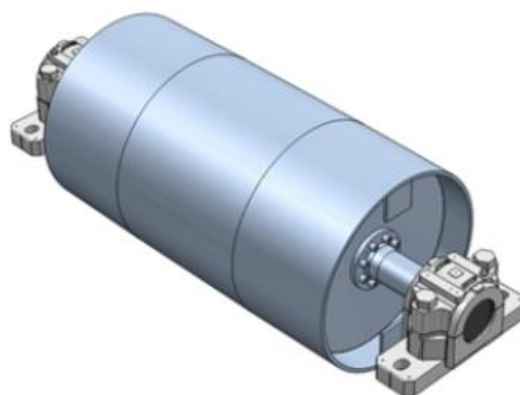
Magnetický separátor se jako celek skládá z několika již vyrobených, případně koupených dílů, jako např. elektromotor, dopravní pás, hnací a vratný buben, neodymový magnet, spojovací elementy atd. Proto jsem se ve své práci převážně zaměřil na konstrukci rámu, hřídelů hnacího a hnaného bubnu, jakožto hlavních nosných prvků. Práce je doplněna o výkresy důležitých součástí, jako např. již zmíněný rám, hřídel hnacího bubnu a výkres sestavy.

3.1.1 HNACÍ A VRATNÝ BUBEN

Hnací a vratný buben jsem zvolil dle [7] od firmy GTK s.r.o určené pro pásové dopravníky (obr. 30 a 31). Bubny jsou pomocí upínacích pouzder [10] spojeny s hnací a vratnou hřídelí. Jelikož dopravní pás vyžaduje neustálé napínání, čímž se zabráňuje prokluzu pásu, bude toto napínání zajištěno vratným bubnem přes dvojici napínacích šroubů umístěných v příčnicích rámu.



Obr. 30: Hnací buben od firmy GTK [7]



Obr. 31: Vratný buben od firmy GTK [7]

Rozměry bubnu:

Průměr bubnu $D_b = 270 \text{ mm}$

Šířka dopravního pásu $B_p = 800 \text{ mm}$

Délka bubnu $L_b = 819 \text{ mm}$

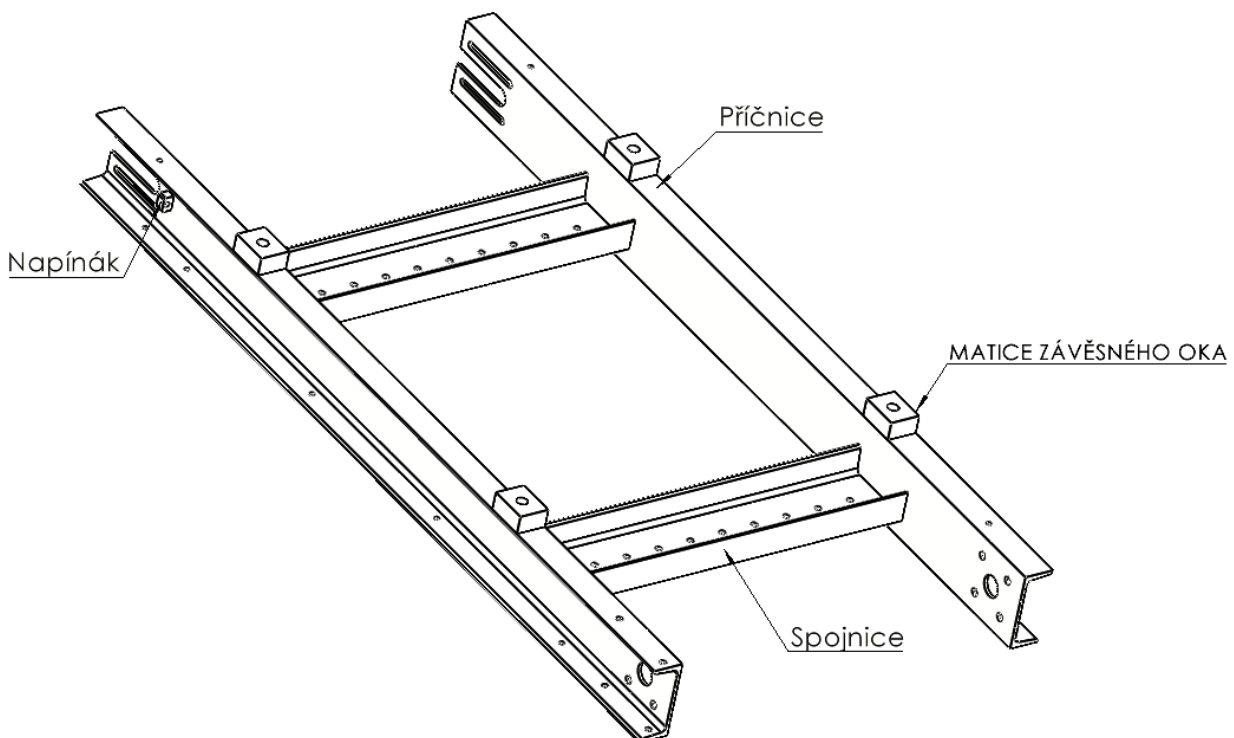
Hmotnost bubnu $m_b = 64,5 \text{ kg}$

3.1.2 RÁM

Konstrukce rámu magnetického separátoru bude svařena z polotovaru ve formě jednotlivých tyčí průřezu U vybraných dle [1]. Materiál tyčí volím 11 375 (S235JR), který zaručuje dobrou svařitelnost a obrobiteľnosť. Rám (viz obr. 32) bude složen ze dvou rovnoběžných tyčí profilu U, které vytvoří příčnice rámu. Kolmo k příčnicím budou po obou stranách v určité vzdálenosti přivařeny dva kratší U profily, které vytvoří spojnice rámu. Ve spojnicích budou vyvrtány díry určené pro uchycení magnetů přes silentbloky vybrané dle [9]. V příčnicích rámu budou dle výkresu vyvrtané díry určené k pozdějšímu uchycení krytů. Dále budou v příčnicích obroběny drážky určené k pozdějšímu uchycení domečkových ložisek. V horní části příčnic budou přivařeny matice určené pro závěsná oka. Na pravé straně příčnice rámu bude při montáži připevněno uchycení motoru vytvořené z plechu tažením, které bude k příčnici uchyceno pomocí čtyř šroubů M12.

Magnety působí na rám spojitým liniovým zatížením, což vede ke vzniku ohybového momentu, jehož hodnota bude později spočítána při pevnostní kontrole rámu. Pro návrh konstrukce předpokládám spojitě liniové zatížení každé spojnice silou $Fq_1 = 1500 [N]$, dohromady tedy $Fq = 3000 [N]$.

Zvolen U profil dle [1]: 4x U180/B ČSN 42 5570 – 11 375

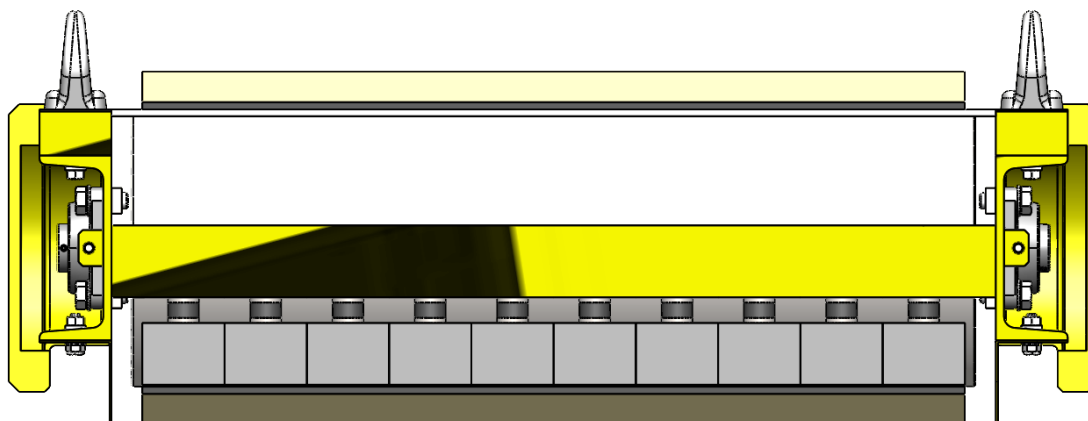


Obr. 32: Konstrukce rámu

3.1.3 MAGNET

Volím sestavu deseti neodymových magnetů (NdFeB), které v současné době patří mezi nejsilnější permanentní magnety na trhu. Magnety v této konstrukci patří mezi nejtěžší a nejdražší část celého zařízení, proto se jejich pořizovací cena pohybuje v řádech několika desítek tisíc korun. Vzhledem k rozměrům navrženého separátoru budou neodymové magnety vyrobeny na zakázku u firmy UNIMAGNET.

V každém magnetu jsou vyvrtané dvě díry M12. Pomocí silentbloků, které jsem volil dle [9] jsou tyto magnety připevněny k rámu magnetického separátoru (viz obr. 33).



Obr. 33: Magnety připevněné k rámu pomocí silentbloků

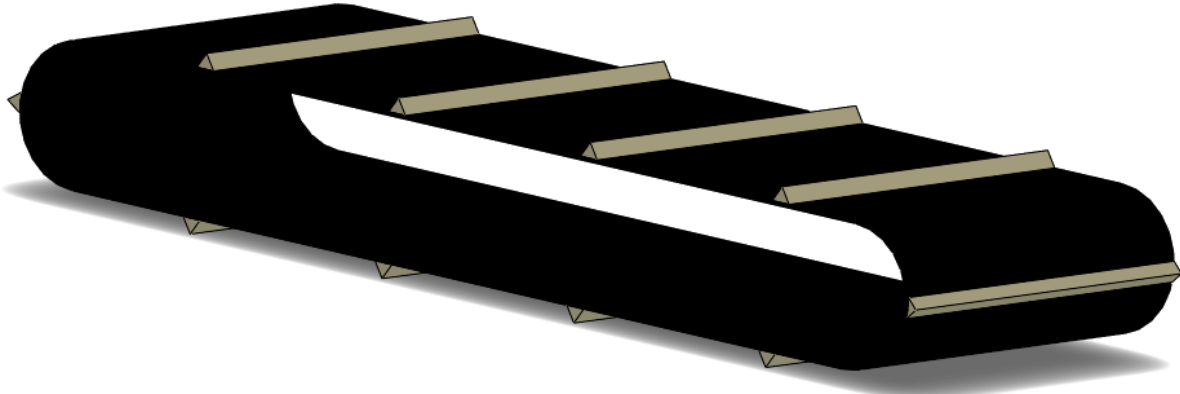
Rozměry magnetu:

Délka magnetu	$L_m = 1400 \text{ mm}$
Šířka magnetu	$B_m = 10 \times 80 \text{ mm}$
Výška magnetu	$h_m = 60 \text{ mm}$
Počet magnetů	$i_m = 10 \text{ ks}$
Hmotnost jednoho magnetu	$m_m = 29,97 \text{ kg}$
Celková hmotnost magnetů	$m_{mcelk} = 299,7 \text{ kg}$

3.1.4 DOPRAVNÍ PÁS

Dle [8] jsem zvolil pryžový dopravní pás pro všeobecné použití s připájenými unašeči (obr. 34). Dopravní pás se vyznačuje vysokou odolností vůči opotřebení. Unašeče zabraňují kumulaci feromagnetického odpadu a při pohybu pásu zajišťují shrnování zmagnetizovaného feromagnetického odpadu, který zůstane přichycen na povrchu pásu mimo pracovní prostor magnetu, tedy mimo vliv magnetického pole. Tím dochází k odmagnetizování odpadu, který odpadá např. do předem připraveného kontejneru.

Pro správný chod je zapotřebí pás dostatečně napnout, což zajišťují napínací šrouby, které jsou umístěny po obou bocích rámu. Napnutí bude prováděno pomocí vratné hřídele. Aby nedošlo k prověšení pásu, jsou v horní části rámu umístěny opěrné lišty.



Obr. 34: Dopravní pás s připájenými unašeči

Rozměry dopravního pásu:

Tloušťka pásu	$t_p = 7 \text{ mm}$
Šířka pásu	$B_p = 800 \text{ mm}$
Hmotnost pásu	$m_p = 7,68 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$
Pevnost pásu v tahu	$R_{mp} = 315 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$
Počet vložek	2
Síla krycí vrstvy	3+2 mm
Označení	EP 250/2 – 800/3+2/ Y

3.2 ZVOLENÉ PARAMETRY

Dopravní rychlost	$v = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Účinnost převodu	$\eta = 0,95$
Vzdálenost mezi osami bubnů	$L_s = 1843 \text{ mm}$
Průměr bubnu	$D_b = 270 \text{ mm}$
Šířka dopravního pásu	$B_p = 800 \text{ mm}$
Zvolený průměrný tah v pásu na bubnu	$F_{pm} = 1000 \text{ N}$

Vektorový součet tahů v pásu na bubnu	$F_T = 2500 \text{ N}$
Navrhovaný průměr hřídele bubnů	$d_0 = 35 \text{ mm}$
Navrhovaný převodový poměr	$i = 5$
Délka magnetického separátoru	$L = 2050 \text{ mm}$

3.3 TABULKOVÉ HODNOTY

Tíhové zrychlení	$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Objemová hmotnost oceli	$\rho_{ocel} = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Globální součinitel tření zahrnující odpory pásu a bubnů	$f_G = 0,02$
Modul pružnosti pro ocel v tahu	$E = 207 \text{ GPa}$
Eulerovo číslo	$e = 2,718281$
Součinitel sklonu pásu	$k_p = 1$
Mez kluzu pro ocel 11 600	$R_e = 325 \text{ MPa}$

3.4 FUNKČNÍ VÝPOČTY

V této podkapitole se zabývám výpočty hlavních konstrukčních uzlů magnetického separátoru, které jsou provedeny dle [4]. Nejprve určím pohonné a převodové ústrojí, následuje pevnostní kontrola rámu a hřídele hnacího bubnu. Ve výpočtech se dále zabývám určením sil působících na dopravní pás a životností ložisek.

3.4.1 OBJEMOVÝ A HMOTNOSTNÍ DOPRAVNÍ VÝKON

TEORETICKÝ PRŮŘEZ MATERIÁLU

$$S = \frac{Q}{\rho_{ocel} \cdot v} \quad [\text{m}^2] \quad (1)$$

$$S = \frac{60000}{7850 \cdot 2,5 \cdot 3600} = 8,493 \cdot 10^{-4}$$

$$S = 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Kde: v – dopravní rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], zvolena dle [20]

Q – dopravované množství [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$], zvoleno dle [3]

ρ_{ocel} – objemová hmotnost oceli [$kg \cdot m^{-3}$], dle [1, str. 60]

OBJEMOVÝ DOPRAVNÍ VÝKON

$$I_v = S \cdot v \cdot k_p \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (2)$$

$$I_v = 8,5 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 1 = 2,125 \cdot 10^{-3}$$

$$I_v = 0,002 \, m^3 \cdot s^{-1}$$

Kde: v – dopravní rychlost [$m \cdot s^{-1}$], zvolena dle [20]

k_p – součinitel sklonu pásu [-], zvolen dle [3]

S – teoretický průřez materiálu [m^2]

HMOTNOSTNÍ DOPRAVNÍ VÝKON

$$I_m = I_v \cdot \rho_{ocel} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (3)$$

$$I_m = 0,002 \cdot 7850 = 15,7$$

$$I_m = 15,7 \, kg \cdot s^{-1}$$

Kde: I_v – objemový dopravní výkon [$m^3 \cdot s^{-1}$]

ρ_{ocel} – objemová hmotnost oceli [$kg \cdot m^{-3}$], dle [1, str. 60]

HMOTNOST JEDNOHO METRU DOPRAVNÍHO PÁSU

$$q_B = m_p \cdot B_p \quad [kg] \quad (4)$$

$$q_B = 7,68 \cdot 0,8 = 6,144$$

$$q_B = 6,14 \, kg$$

Kde: m_p – hmotnost pásu [$kg \cdot m^{-1}$], dle [8]

B_p – šířka pásu [m], dle [8]

HMOTNOST DOPRAVOVANÉHO MATERIÁLU NA JEDEN METR PÁSU

$$q_G = \frac{I_m}{v} \quad [kg \cdot m^{-1}] \quad (5)$$

$$q_G = \frac{15,7}{2,5} = 6,28$$

$$q_G = 6,28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$$

Kde: v – dopravní rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], zvolena dle [20]

I_m – hmotnostní dopravní výkon [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

UŽITEČNÁ ŠÍŘKA DOPRAVNÍHO PÁSU

$$b = (0,9 \cdot B_p) - 0,05 \text{ [m]} \quad (6)$$

$$b = (0,9 \cdot 0,8) - 0,05 = 0,67$$

$$b = 0,67 \text{ m}$$

Kde: B_p – šířka pásu [m], dle [8]

3.4.2 HLAVNÍ ODPORY

$$F_H = f_G \cdot L_s \cdot g \cdot (2 \cdot q_B + q_G) \text{ [N]} \quad (7)$$

$$F_H = 0,02 \cdot 1,843 \cdot 9,81 \cdot (2 \cdot 6,14 + 6,28) = 6,71$$

$$F_H = 7 \text{ N}$$

Kde: f_G – globální součinitel tření zahrnující odpory pásu a bubnů [–], zvolen dle [3, str. 7]

q_G – hmotnost dopravovaného materiálu na jeden metr pásu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$]

q_B – hmotnost jednoho metru dopravního pásu [kg]

g – tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

L_s – vzdálenost mezi osami bubnu [m]

3.4.3 VEDLEJŠÍ ODPORY

ODPORY SETRVAČNÝCH SIL V MÍSTĚ NAKLÁDÁNÍ A V OBLASTI URYCHLOVÁNÍ

$$F_{bA} = I_V \cdot \rho_{ocel} \cdot (v - v_0) \text{ [N]} \quad (8)$$

$$F_{bA} = 0,002 \cdot 7850 \cdot 2,5 = 39,25$$

$$F_{bA} = 39 \text{ N}$$

Kde: v – dopravní rychlost [$m \cdot s^{-1}$], zvolena dle [20]

I_v – objemový dopravní výkon [$m^3 \cdot s^{-1}$]

ρ_{ocel} – objemová hmotnost oceli [$kg \cdot m^{-3}$], dle [1, str. 60]

v_0 – složka rychlosti dopravované hmoty ve směru pohybu pásu [$m \cdot s^{-1}$]

ODPOR OHYBU PÁSU NA BUBNECH

$$F_l = 9 \cdot B_p \cdot \left(140 + 0,01 \cdot \frac{F_{pm}}{B_p} \right) \cdot \frac{t_p}{D_b} [N] \quad (9)$$

$$F_l = 9 \cdot 0,8 \cdot \left(140 + 0,01 \cdot \frac{1000}{0,8} \right) \cdot \frac{0,007}{0,27} = 28,47$$

$$F_l = 28,5 N$$

Kde: D_b – průměr bubnu [m], zvolen dle [7]

F_{pm} – průměrný tah v pásu na bubnu [N]

B_p – šířka pásu [m], dle [8]

t_p – tloušťka pásu [m], dle [8]

ODPOR V LOŽISCÍCH HNANÉHO BUBNU

$$F_t = 0,005 \cdot F_T \cdot \frac{d_0}{D_b} [N] \quad (10)$$

$$F_t = 0,005 \cdot 2500 \cdot \frac{0,035}{0,27} = 1,62$$

$$F_t = 1,6 N$$

Kde: d_0 – navrhovaný průměr hřídele bubnů [m]

D_b – průměr bubnu [m], zvolen dle [7]

F_T – vektorový součet tahů v pásu na bubnu [N]

VEDLEJŠÍ ODPORY

$$F_N = F_{bA} + F_l + F_t [N] \quad (11)$$

$$F_N = 39 + 28,5 + 1,6 = 69,1$$

$$F_N = 69 \text{ N}$$

Kde: F_{bA} – odpory setrvačných sil v místě nakládání a oblasti urychlování [N]

F_l – odpor ohybu pásu na bubnech [N]

F_t – odpor v ložiscích hnaného bubnu [N]

3.4.4 NÁVRH POHONNÉHO A PŘEVODOVÉHO ÚSTROJÍ OBVODOVÁ HNACÍ SÍLA POTŘEBNÁ NA POHÁNĚCÍM BUBNU

$$F_U = F_H + F_N \text{ [N]} \quad (12)$$

$$F_U = 7 + 69 = 76$$

$$F_U = 76 \text{ N}$$

Kde: F_H – hlavní odpory [N]

F_N – vedlejší odpory [N]

POTŘEBNÝ PROVOZNÍ VÝKON POHONU MAGNETICKÉHO SEPARÁTORU

$$P = F_U \cdot v \text{ [W]} \quad (13)$$

$$P = 76 \cdot 2,5 = 190$$

$$P = 190 \text{ W}$$

Kde: v – dopravní rychlost [$m \cdot s^{-1}$], zvolena dle [20]

F_U – obvodová hnací síla potřebná na poháněcím bubnu [N]

POTŘEBNÝ PROVOZNÍ VÝKON POHONU NA HNACÍM BUBNU

$$P' = \frac{P}{\eta} \text{ [W]} \quad (14)$$

$$P' = \frac{190}{0,95} = 200$$

$$P' = 200 \text{ W}$$

Kde: P – potřebný provozní výkon pohonu magnetického separátoru [W]

η – účinnost převodu [–], zvolena dle [3, str. 9]

OTÁČKY BUBNU

$$n_B = \frac{v}{\pi \cdot (D_b + 2 \cdot t_p)} [s^{-1}] \quad (15)$$

$$n_B = \frac{2,5}{\pi \cdot (0,27 + 2 \cdot 0,007)} = 2,802 s^{-1}$$

$$n_B = 2,8 s^{-1} = 168 \text{ min}^{-1}$$

Kde: v – dopravní rychlost [$m \cdot s^{-1}$], zvolena dle [20]

D_b – průměr bubnu [m], zvolen dle [7]

t_p – tloušťka pásu [m], dle [8]

ÚHLOVÁ RYCHLOST BUBNU

$$\omega_B = 2 \cdot \pi \cdot n_B [rad \cdot s^{-1}] \quad (16)$$

$$\omega_B = 2 \cdot \pi \cdot 2,8 = 17,593$$

$$\omega_B = 17,6 rad \cdot s^{-1}$$

Kde: n_B – otáčky bubnu [s^{-1}]

SKUTEČNÉ PŘEVODOVÉ ČÍSLO

$$i_{skut} = \frac{n_{mot}}{n_B} [-] \quad (17)$$

$$i_{skut} = \frac{1375}{168} = 8,185$$

$$i_{skut} = 8,2$$

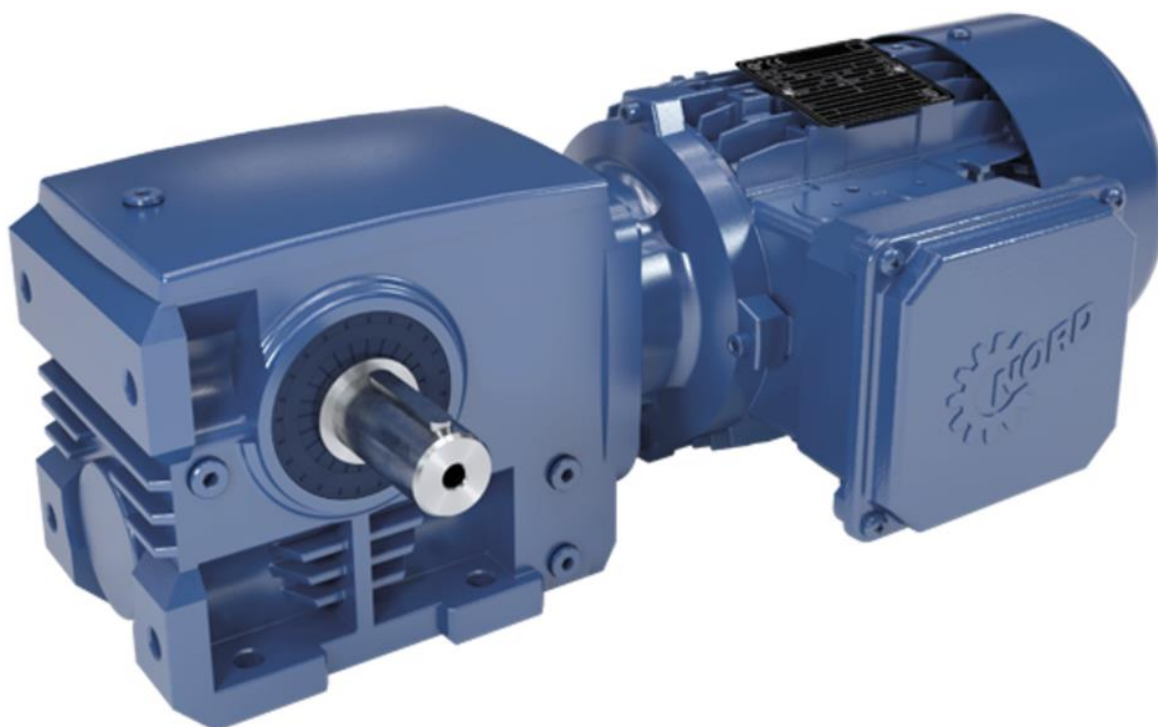
Kde: n_B – otáčky bubnu [min^{-1}]

n_{mot} – otáčky hřídele elektromotoru [min^{-1}], zvoleny dle [15]

ZVOLENÉ POHONNÉ A PŘEVODOVÉ ÚSTROJÍ

Dle [15] volím standardní asynchronní elektromotor se šnekovou převodovkou od firmy NORD (obr. 35), která přenáší točivý moment na hřídel hnacího bubnu pomocí drážky pro pero. Tento motor s převodovkou je vhodný pro trvalý provoz. Pro mazání se využívá dle katalogu NORD [33] syntetický olej VG 680. Jak již bylo zmíněno, patří šnekové převodovky mezi úhlové převodovky, kde motorový a výstupní hřídel svírají úhel 90° . Tyto převodovky zaručují maximální únosnost, dlouhou životnost a nízkou hlučnost.

Zvolený elektromotor má skoro třikrát vyšší výkon než je požadovaný výkon pro provoz separátoru. Důvodem pro volbu vyššího výkonu je zajištění funkčnosti, plynulosti chodu a v případě větší zátěže separátoru tato rezerva ve výkonu zabrání přehřívání elektromotoru.



Obr. 35: Šneková převodovka firmy Nord [15]

Parametry elektromotoru:

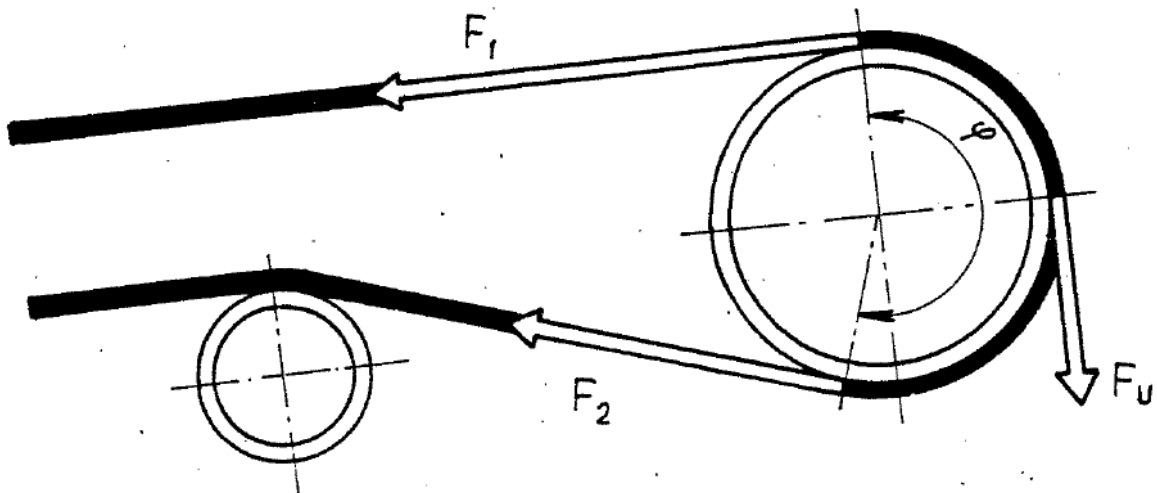
Výkon elektromotoru	$P_{mot} = 550 \text{ W}$
Otáčky hřídele elektromotoru	$n_{mot} = 1375 \text{ min}^{-1}$
Otáčky na výstupu z převodovky	$n_{přev} = 275 \text{ min}^{-1}$
Hmotnost motoru	$m_{mot} = 20 \text{ kg}$

Označení zvoleného elektromotoru se šnekovou převodovkou: SK 1SIS75F-IEC80-80S/4

3.4.5 TAHOVÉ SÍLY PŮSOBÍCÍ V PÁSU A PŘENOS OBVODOVÉ HNACÍ SÍLY

Aby magnetický separátor plnil svou funkci správně, je nutné, aby tahy v pásu (obr. 36) splňovaly dvě podmínky [4]:

- Obvodové hnací síly z poháněného bubnu musejí být na pás přenášeny třením bez prokluzu.
- Tah v pásu musí být dostatečný, aby nedocházelo k příliš velkému průvěsu mezi dvěma válečkovými stolicemi.



Obr. 36: Tahové síly působící v pásu [4]

MAXIMÁLNÍ OBVODOVÁ SÍLA

$$F_{Umax} = F_U \cdot \xi \text{ [N]} \quad (18)$$

$$F_{Umax} = 76 \cdot 1,5 = 114$$

$$F_{Umax} = 114 \text{ N}$$

Kde: F_U – obvodová hnací síla potřebná na poháněcím bubnu [N]

ξ – součinitel rozběhu [-], zvolen dle [4, str. 10]

MINIMÁLNÍ TAHOVÁ SÍLA VE SBÍHAJÍCÍ VĚTVI ŘEMENU

$$F_{2,min} \geq F_{Umax} \cdot \left(\frac{1}{e^{\mu \cdot \varphi} - 1} \right) \text{ [N]} \quad (19)$$

$$F_{2,min} \geq 114 \cdot \left(\frac{1}{e^{0,3 \cdot 3,14} - 1} \right) = 72,84$$

$$F_{2,min} = 72,8 \text{ N}$$

Kde: F_{Umax} – maximální obvodová síla [N]

μ – součinitel tření mezi poháněcím bubnem a pásem [-], zvolen dle [4, str. 13 tab. 4]

φ – úhel opásání poháněcího bubnu [rad], [4, str. 9] dle uspořádání volím 180°

NEJVĚTŠÍ TAHOVÁ SÍLA V PÁSU

$$F_{max} \approx F_1 \approx F_{Umax} \cdot \left(\frac{1}{e^{\mu \cdot \varphi - 1}} + 1 \right) [N] \quad (20)$$

$$F_{max} \approx F_1 \approx 114 \cdot \left(\frac{1}{e^{0,35 \cdot 3,14 - 1}} + 1 \right) = 170,97$$

$$F_{max} \approx F_1 = 171 \text{ N}$$

Kde: F_{Umax} – maximální obvodová síla [N]

μ – součinitel tření mezi poháněcím bubnem a pásem [-], zvolen dle [4, str. 13 tab. 4]

φ – úhel opásání poháněcího bubnu [rad], [4, str. 9] dle uspořádání volím 180°

TAHOVÁ SÍLA V NOSNÉ VĚTVI

$$F_1 = F_{max} [N] \quad (21)$$

$$F_1 = 171 \text{ N}$$

Kde: F_{max} – největší tahová síla v pásu [N]

TAHOVÁ SÍLA VE VRATNÉ VĚTVI

$$F_2 = \frac{F_1}{e^{\mu \cdot \varphi}} [N] \quad (22)$$

$$F_2 = \frac{171}{e^{0,3 \cdot 3,14}} = 66,66$$

$$F_2 = 66,7 \text{ N}$$

Kde: μ – součinitel tření mezi poháněcím bubnem a pásem [-], zvolen dle [4, str. 13 tab. 4]

F_1 – tahová síla v nosné větvi [N]

φ – úhel opásání poháněcího bubnu [rad], [4, str. 9] dle uspořádání volím 180°

SKUTEČNÝ TAH V PÁSU

Výslednice v ose X:

$$F_{Sx} = F_1 + F_2 \cdot \cos(\varphi - 180) [N] \quad (23)$$

$$F_{Sx} = 171 + 66,7 \cdot \cos(180 - 180) = 237,7$$

$$F_{Sx} = 237,7 N$$

Výslednice v ose Y:

$$F_{Sy} = F_2 \cdot \sin(\varphi - 180) [N] \quad (24)$$

$$F_{Sy} = 66,7 \cdot \sin(180 - 180) = 0$$

$$F_{Sy} = 0 N$$

Skutečný tah v pásu:

$$F_S = \sqrt{F_{Sx}^2 + F_{Sy}^2} [N] \quad (25)$$

$$F_S = \sqrt{237,7^2 + 0^2} = 237,7$$

$$F_S = 237,7 N$$

Kde: F_1 – tahová síla v nosné větvi [N]

F_2 – tahová síla ve vratná větvi [N]

F_{Sy} – tahová síla v ose Y [N]

F_{Sx} – tahová síla v ose X [N]

φ – úhel opásání poháněcího bubnu [rad], [4, str. 9] dle uspořádání volím 180°

NAPÍNAČÍ SÍLA

Vypočtenou hodnotu skutečného tahu pásu F_S zvyšují o 10%, aby bylo zajištěno, že napínací síla bude dostatečná a pás nebude prokluzovat.

$$F_{nap} = 1,1 \cdot F_S [N] \quad (26)$$

$$F_{nap} = 1,1 \cdot 237,7 = 261,47$$

$$F_{nap} = 261,5 \text{ N}$$

Kde: F_S – skutečný tah v pásu [N]

PEVNOSTNÍ KONTROLA PÁSU

$$F_{Dp} \geq F_{max} \text{ [N]} \quad (27)$$

$$F_{Dp} = R_{mp} \cdot B_p \text{ [N]} \quad (28)$$

$$F_{Dp} = 315 \cdot 800 = 25200$$

$$F_{Dp} = 25200 \text{ N}$$

$25200 \text{ N} \geq 213,9 \text{ N}$ Podmínka byla splněna, zvolený dopravní pás vyhovuje.

Kde: F_{Dp} – dovolená tahová síla [N]

F_{max} – největší tahová síla v pásu [N]

B_p – šířka pásu [mm], dle [8]

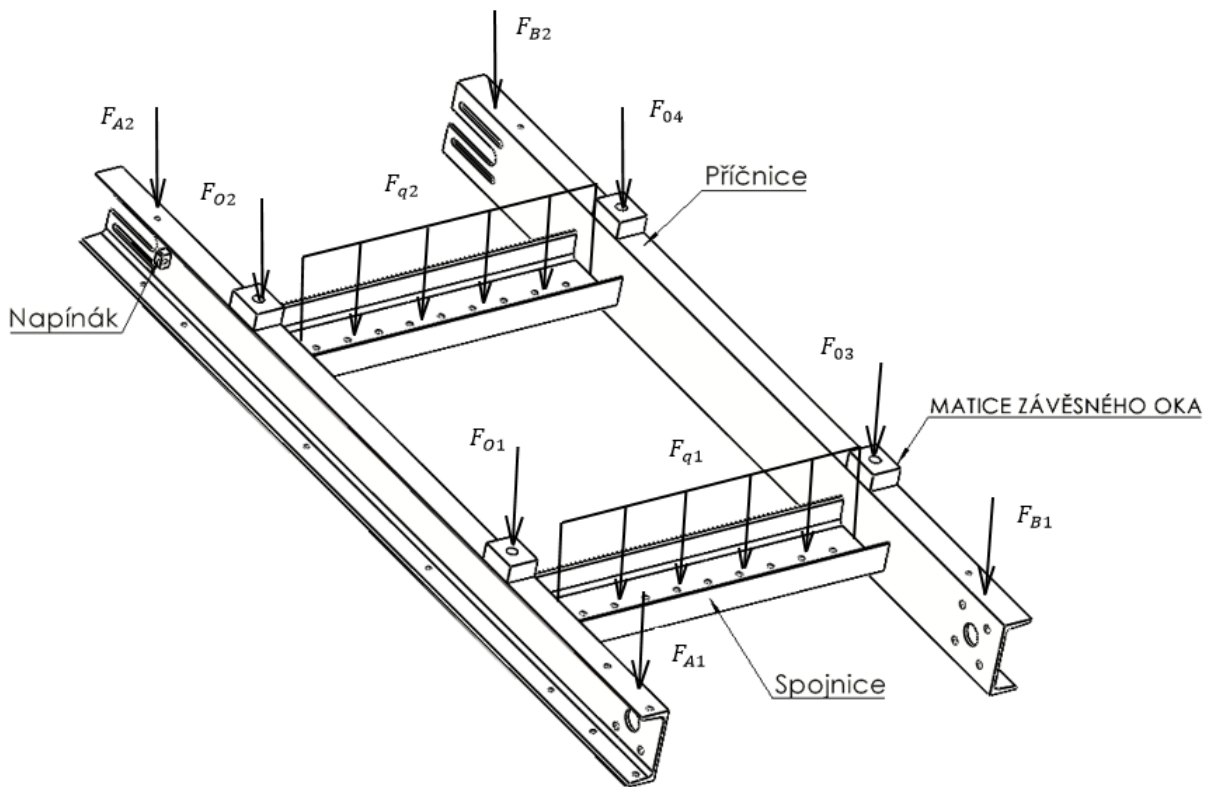
R_{mp} – pevnost pásu v tahu [$N \cdot mm^{-1}$], dle [8]

3.4.6 PEVNOSTNÍ KONTROLA RÁMU

Jak již bylo zmíněno v podkapitole zabývající se konstrukcí rámu, působí sestava deseti magnetů na rám spojitým liniovým zatížením, což vede ke vzniku ohybového momentu, který způsobuje průhyb rámu.

Před samotným výpočtem bylo zapotřebí provést zjednodušení spočívající v rozdělení rámu na jednotlivé nosníky. Příčnice rámu uvažují jako vetknutí, mezi nimiž se nachází spojnice. Na každou spojnicí působí spojitě liniové zatížení silou $Fq1 = 1500 \text{ N}$, dohromady tedy $Fq = 3000 \text{ N}$ způsobené hmotností magnetů. Vzhledem k způsobu uložení se jedná o staticky neurčitý nosník. Pro výpočet průhybu a výsledných vnitřních účinků jsem využil vzorců dle [32]. Průběhy těchto hodnot jsou znázorněny na obr. 38.

Vzhledem k tomu, že na rám působí poměrně malé síly (obr. 37) předpokládám, že rám je z hlediska bezpečnosti dostačující, čemuž napovídá i relativně nízká hodnota průhybu. Výpočty spojené s příčnicemi rámu v této práci neuvádím kvůli složitosti těchto výpočtů.



Obr. 37: Schéma působících sil na rám

SPOJITÉ LINIOVÉ ZATÍŽENÍ OD SESTAVY MAGNETŮ PŮSOBÍCÍ NA SPOJNICI PROFILU U

$$q_m = \frac{F_q}{L_U} \text{ [kN} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (29)$$

$$q_m = \frac{3000}{0,86} = 3488$$

$$q_m = 3,5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Kde: L_U – délka spojnice [m]

F_q – síla od spojitého liniového zatížení [N]

MAXIMÁLNÍ POSOUVAJÍCÍ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA SPOJNICI

$$T_{Zmax} = T_A = -T_B = \frac{q_m \cdot L_U}{2} \text{ [N]} \quad (30)$$

$$T_{Zmax} = -T_A = T_B = \frac{3500 \cdot 0,86}{2} = 1505$$

$$T_{Zmax} = -T_A = T_B = 1505 \text{ N}$$

Kde: L_U – délka spojnice [m]

q_m – spojitě liniové zatížení od sestavy magnetů [$N \cdot m^{-1}$]

MAXIMÁLNÍ OHYBOVÝ MOMENT PŮSOBÍCÍ NA SPOJNICI

$$M_{Omax} = M_A = M_B = \frac{q_m \cdot L_U^2}{12} [N \cdot m] \quad (31)$$

$$M_{Omax} = M_A = M_B = \frac{3500 \cdot 0,86^2}{12} = 215,717$$

$$M_{Omax} = M_A = M_B = 215,7 N \cdot m$$

Kde: L_U – délka spojnice [m]

q_m – spojitě liniové zatížení od sestavy magnetů [$N \cdot m^{-1}$]

OHYBOVÝ MOMENT PŮSOBÍCÍ UPROSTŘED SPOJNICE

$$M_{O1/2} = \frac{q_m \cdot L_U^2}{24} [N \cdot m] \quad (32)$$

$$M_{O1/2} = \frac{3500 \cdot 0,86^2}{24} = 107,858$$

$$M_{O1/2} = 107,9 N \cdot m$$

Kde: L_U – délka spojnice [m]

q_m – spojitě liniové zatížení od sestavy magnetů [$N \cdot m^{-1}$]

OHYBOVÉ NAPĚTÍ V RÁMU

$$\sigma_O = \frac{M_{Omax} \cdot \alpha_O}{W_{OR}} [MPa] \quad (33)$$

$$\sigma_O = \frac{215700 \cdot 1,3}{22400} = 12,518$$

$$\sigma_O = 12,5 MPa$$

Kde: M_{Omax} – maximální ohybový moment působící na spojnici [$N \cdot mm$]

W_{OR} – modul průřezu v ohybu pro spojnici [mm^3], dle [1, str. 295]

α_O – součinitel koncentrace napětí v ohybu pro rám [-], dle [1, str. 51]

MAXIMÁLNÍ PRŮHYB RÁMU

$$W_{Umax} = \frac{q_m \cdot L_U^4}{384 \cdot E \cdot J_U} \quad [mm] \quad (34)$$

$$W_{Umax} = \frac{3,5 \cdot 860^4}{384 \cdot 207 \cdot 10^3 \cdot 853000} = 0,0282$$

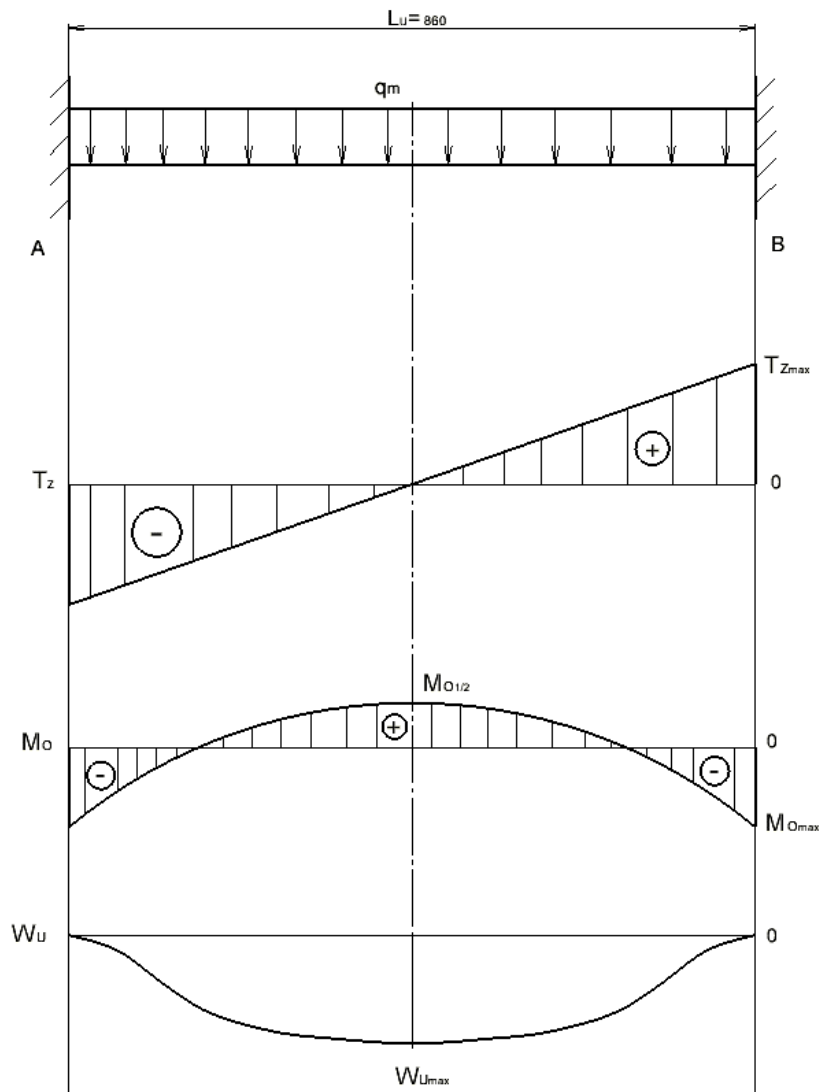
$$W_{Umax} = 0,028 \text{ mm}$$

Kde: L_U – délka spojnice [mm]

J_U – kvadratický moment v ohybu pro spojnici [mm^4], dle [1, str. 295]

E – modul pružnosti oceli v tahu [MPa], dle [1]

q_m – spojitě liniové zatížení od sestavy magnetů [$N \cdot mm^{-1}$]



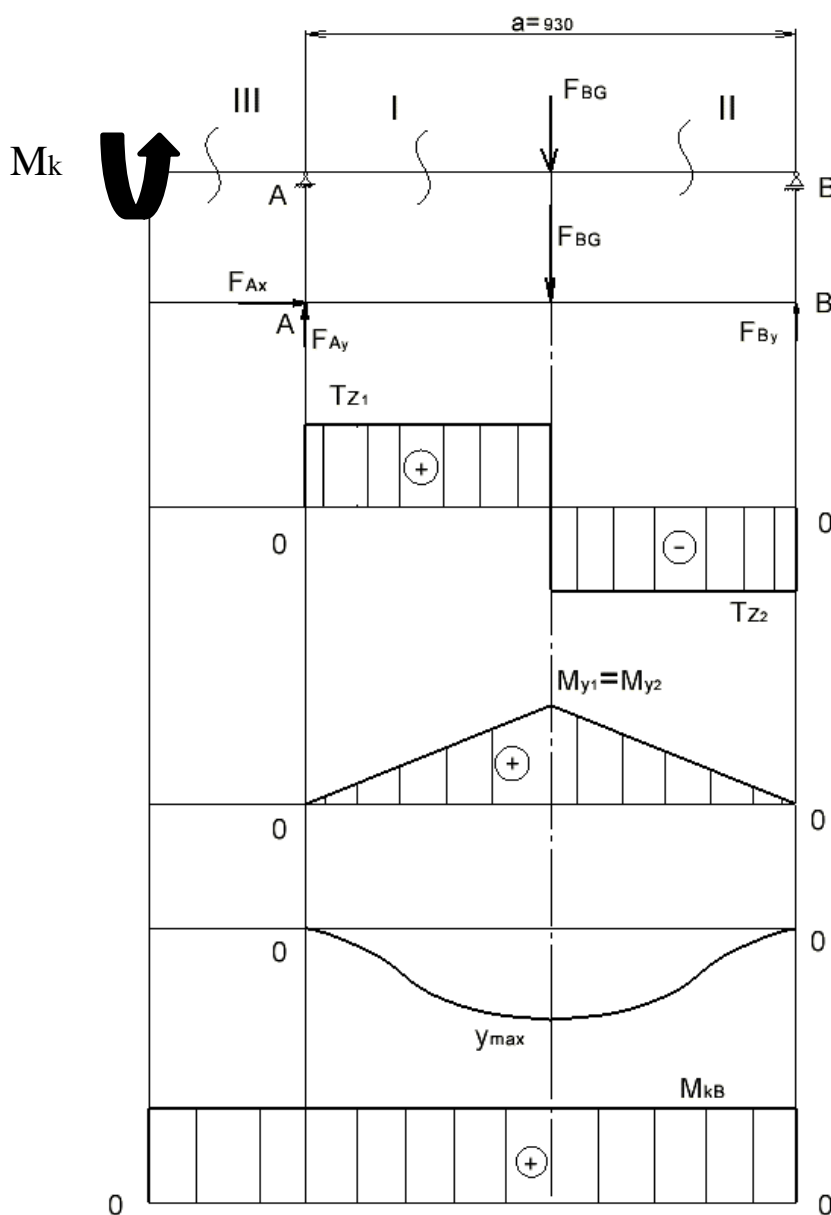
Obr. 38: VVÚ rámu

3.4.7 PEVNOSTNÍ KONTROLA HŘÍDELE HNACÍHO BUBNU

Před samotným pevnostním výpočtem hnacího hřídele je třeba nejprve určit síly působící na hřídel, konkrétně se jedná o axiální a radiální síly z ložisek a sílu od hmotnosti bubnu působící ve středu hřídele. Pomocí silové rovnováhy určíme velikost těchto sil, poté následuje výpočet výsledných vnitřních účinků, jejichž průběh je znázorněn na obr. 39.

Součástí kontroly hřídele je výpočet průhybu osy hřídele. Před tímto výpočtem je zapotřebí určit minimální průměr hřídele dle podmínky HMH, který je pro usnadnění výpočtu uvažován po celé délce hřídele konstantní. Následuje samotný výpočet průhybu osy hřídele podle Castiglianovy metody, jejíž výsledek je třeba srovnat s dovolenou hodnotou průhybu.

Jako poslední je proveden výpočet bezpečnosti podle MSP a MSÚ, který ověří, zda je hřídel schopen dané namáhání vydržet.



Obr. 39: VVÚ hnacího hřídele

SÍLA OD VLASTNÍ HMOTNOSTI BUBNU

$$F_{BG} = m_b \cdot g [N] \quad (35)$$

$$F_{BG} = 64,5 \cdot 9,81 = 632,745$$

$$F_{BG} = 632,75 N$$

Kde: m_b – hmotnost bubnu [kg]

g – tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-1}$]

SILOVÁ ROVNOVÁHA**SUMA SIL V OSE X**

$$\sum F_x = 0: F_{Ax} = 0 \quad (36)$$

Kde: F_{Ax} – axiální síla v ložisku A [N]

SUMA SIL V OSE Y

$$\sum F_y = 0: F_{Ay} - F_{BG} + F_{By} = 0 \quad (37)$$

$$F_{Ay} = F_{BG} - F_{By} [N]$$

$$F_{Ay} = 632,75 - 316,38 = 316,38$$

$$F_{Ay} = 321,77 N$$

Kde: F_{Ay} – radiální síla v ložisku A [N]

F_{By} – radiální síla v ložisku B [N]

F_{BG} – síla od vlastní hmotnosti bubnu [N]

SUMA MOMENTŮ K BODU A

$$\sum M_A = 0: F_{By} \cdot a - F_{BG} \cdot \frac{a}{2} = 0 \quad (38)$$

$$F_{By} = \frac{F_{BG} \cdot \frac{a}{2}}{b} [N]$$

$$F_{By} = \frac{643,54 \cdot \frac{930}{2}}{930} = 316,38$$

$$F_{By} = 316,38 \text{ N}$$

Kde: F_{By} – radiální síla v ložisku B [N]

F_{BG} – síla od vlastní hmotnosti bubnu [N]

a – vzdálenost mezi osami ložisek [mm]

PRŮBĚH VVÚ

POSOUVAJÍCÍ SÍLA V ŘEZU 1

$$T_{z1} - F_{Ay} = 0 \quad (39)$$

$$T_{z1} = F_{Ay} \text{ [N]}$$

$$T_{z1} = 316,38 \text{ N}$$

Kde: F_{Ay} – radiální síla v ložisku A [N]

OHYBOVÝ MOMENT V ŘEZU 1

$$M_{y1} - F_{Ay} \cdot \frac{a}{2} = 0 \quad (40)$$

$$M_{y1} = F_{Ay} \cdot \frac{a}{2} \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

$$M_{y1} = 321,77 \cdot \frac{930}{2} = 147116,7$$

$$M_{y1} = 147117 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Kde: F_{Ay} – radiální síla v ložisku A [N]

a – vzdálenost mezi osami ložisek [mm]

POSOUVAJÍCÍ SÍLA V ŘEZU 2

$$-T_{z2} - F_{By} = 0 \quad (41)$$

$$T_{z2} = -F_{By} \text{ [N]}$$

$$T_{z2} = -316,38 \text{ N}$$

Kde: F_{By} – radiální síla v ložisku B [N]

OHYBOVÝ MOMENT V ŘEZU 2

$$-M_{y2} + F_{By} \cdot \frac{a}{2} = 0 \quad (42)$$

$$M_{y2} = F_{By} \cdot \frac{a}{2} [N \cdot mm]$$

$$M_{y2} = 321,77 \cdot \frac{930}{2} = 147116,7$$

$$M_{y2} = 147117 N \cdot mm$$

Kde: F_{By} – radiální síla v ložisku B [N]

a – vzdálenost mezi osami ložisek [mm]

KROUTICÍ MOMENT PŮSOBÍCÍ V ŘEZECH 1, 2, 3

$$M_{kB} = \frac{P_{mot} \cdot D_b}{2 \cdot v} [N \cdot mm] \quad (43)$$

$$M_{kB} = \frac{550 \cdot 270}{2 \cdot 2,5} = 29700$$

$$M_{kB} = 29700 N \cdot mm$$

Kde: v – dopravní rychlost [$m \cdot s^{-1}$], zvolena dle [20]

D_b – průměr bubnu [mm], zvolen dle [7]

P_{mot} – výkon elektromotoru [W], zvolen dle [15]

MINIMÁLNÍ PRŮMĚR HŘÍDELE DLE PODMÍNKY HMH

Materiál hřídele volím dle [1] ocel 11 600 (E335).

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3 \cdot \tau_k^2} = \sqrt{\left(\frac{M_o \cdot \alpha_\sigma}{W_o}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{M_k \cdot \alpha_\tau}{W_k}\right)^2} \leq \frac{R_e}{k_n} \quad (44)$$

$$\frac{R_e}{k_n} = \sqrt{\left(\frac{32 \cdot M_{y1} \cdot \alpha_\sigma}{\pi \cdot d_{min}^3}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{16 \cdot M_{kB} \cdot \alpha_\tau}{\pi \cdot d_{min}^3}\right)^2}$$

$$d_{min} = \sqrt[6]{\frac{k_n^2 \cdot (1024 \cdot M_{y1}^2 \cdot \alpha_\sigma^2 + 768 \cdot M_{kB}^2 \cdot \alpha_\tau^2)}{\pi^2 \cdot R_e^2}} [mm]$$

$$d_{min} = \sqrt[6]{\frac{2^2 \cdot (1024 \cdot 147117^2 \cdot 2^2 + 768 \cdot 29700^2 \cdot 3^2)}{\pi^2 \cdot 325^2}} = 26,715$$

$d_{min} = 26,7 \text{ mm}$ Pro další výpočty volím minimální průměr hřídele $d_{min} = 30 \text{ mm}$.

Kde: M_k – krouticí moment [$N \cdot mm$]

M_{kB} – krouticí moment působící na buben [$N \cdot mm$]

R_e – mez kluzu pro ocel 11 600 [MPa], dle [31]

W_O – modul průřezu v ohybu [mm^3]

W_k – modul průřezu v krutu [mm^3]

k_n – návrhový součinitel [–], zvolen dle [1, str. 38]

τ_k – napětí v krutu [MPa]

σ_O – napětí v ohybu [MPa]

M_O – ohybový moment [$N \cdot mm$]

M_{y1} – ohybový moment v řezu 1 [$N \cdot mm$]

σ_{RED} – redukované napětí dle HMH [MPa]

α_τ – součinitel koncentrace napětí pro krut [–], dle [2, str. 1115]

α_σ – součinitel koncentrace napětí pro ohyb [–], dle [2, str. 1115]

PRŮHYB OSY HŘÍDELE

Průhyb osy hřídele spočítán podle Castiglianovy metody.

DOVOLENÝ PRŮHYB OSY HŘÍDELE

$$y_{DOV} = \frac{a}{3000} [mm] \quad (45)$$

$$y_{DOV} = \frac{930}{3000} = 0,31$$

$$y_{DOV} = 0,31 \text{ mm}$$

Výpočet proveden dle [2, str. 1062].

Kde: a – vzdálenost mezi osami ložisek [mm]

KVADRATICKÝ MOMENT PRŮŘEZU

$$J_{y1} = J_{z1} = \frac{\pi \cdot d_{min}^4}{64} [mm^4] \quad (46)$$

$$J_{y1} = J_{z1} = \frac{\pi \cdot 30^4}{64} = 39760,782$$

$$J_{y1} = J_{z1} = 39760,78 \text{ mm}^4$$

Kde: d_{min} – minimální průměr hřídele [mm]

MAXIMÁLNÍ PRŮHYB OSY HŘÍDELE

$$y_{max} = \int_0^{a/2} \frac{F_{Ay} \cdot x}{2 \cdot E \cdot J_{y1}} \cdot x dx + \int_0^{a/2} \frac{F_{By} \cdot x}{2 \cdot E \cdot J_{y1}} \cdot x dx \quad (47)$$

$$y_{max} = \left[\frac{F_{Ay} \cdot x^3}{6 \cdot E \cdot J_{y1}} \right]_0^{a/2} + \left[\frac{F_{By} \cdot x^3}{6 \cdot E \cdot J_{y1}} \right]_0^{a/2} = \frac{F_{Ay} \cdot \left(\frac{a}{2}\right)^3}{6 \cdot E \cdot J_{y1}} + \frac{F_{By} \cdot \left(\frac{a}{2}\right)^3}{6 \cdot E \cdot J_{y1}} [mm]$$

$$y_{max} = \frac{316,38 \cdot \left(\frac{930}{2}\right)^3}{6 \cdot 207 \cdot 10^3 \cdot 39760,78} + \frac{316,38 \cdot \left(\frac{930}{2}\right)^3}{6 \cdot 207 \cdot 10^3 \cdot 39760,78} = 1,288$$

$$y_{max} = 1,29 \text{ mm}$$

Kde: J_{y1} – kvadratický moment průřezu [mm⁴]

E – modul pružnosti oceli v tahu [MPa], dle [1]

F_{Ay} – radiální síla v ložisku A [N]

F_{By} – radiální síla v ložisku B [N]

a – vzdálenost mezi osami ložisek [mm]

PODMÍNKY PRŮHYBU

$$y_{DOV} > y_{max} [mm] \quad (48)$$

$$0,31 \text{ mm} < 1,3 \text{ mm}$$

Kde: y_{max} – maximální průhyb osy hřídele [mm]

y_{DOV} – dovolený průhyb osy hřídele [mm]

Z této podmínky vyplývá, že při průměru hřídele $d_{min} = 30 \text{ mm}$ je průhyb několikanásobně vyšší, než dovolený. Proto musím zvýšit průměr hřídele na $d_{min} = 45 \text{ mm}$, což zajistí menší průhyb hřídele.

KVADRATICKÝ MOMENT PRŮŘEZU

$$J_{y1} = J_{z1} = \frac{\pi \cdot d_{min}^4}{64} [mm^4] \quad (49)$$

$$J_{y1} = J_{z1} = \frac{\pi \cdot 45^4}{64} = 201288,959$$

$$J_{y1} = J_{z1} = 201288,96 mm^4$$

Kde: d_{min} – minimální průměr hřídele [mm]

MAXIMÁLNÍ PRŮHYB OSY HŘÍDELE

$$y_{max} = \int_0^{a/2} \frac{F_{Ay} \cdot x}{2 \cdot E \cdot J_{y1}} \cdot x dx + \int_0^{a/2} \frac{F_{By} \cdot x}{2 \cdot E \cdot J_{y1}} \cdot x dx \quad (50)$$

$$y_{max} = \left[\frac{F_{Ay} \cdot x^3}{6 \cdot E \cdot J_{y1}} \right]_0^{a/2} + \left[\frac{F_{By} \cdot x^3}{6 \cdot E \cdot J_{y1}} \right]_0^{a/2} = \frac{F_{Ay} \cdot \left(\frac{a}{2}\right)^3}{6 \cdot E \cdot J_{y1}} + \frac{F_{By} \cdot \left(\frac{a}{2}\right)^3}{6 \cdot E \cdot J_{y1}} [mm]$$

$$y_{max} = \frac{316,38 \cdot \left(\frac{930}{2}\right)^3}{6 \cdot 207 \cdot 10^3 \cdot 201288,96} + \frac{316,38 \cdot \left(\frac{930}{2}\right)^3}{6 \cdot 207 \cdot 10^3 \cdot 201288,96} = 0,255$$

$$y_{max} = 0,26 mm$$

Kde: J_{y1} – kvadratický moment průřezu [mm⁴]

E – modul pružnosti oceli v tahu [MPa], dle [1]

F_{Ay} – radiální síla v ložisku A [N]

F_{By} – radiální síla v ložisku B [N]

a – vzdálenost mezi osami ložisek [mm]

PODMÍNKA PRŮHYBU

$$y_{DOV} > y_{max} [mm] \quad (51)$$

$$0,31 mm > 0,26 mm$$

Kde: y_{max} – maximální průhyb osy hřídele [mm]

y_{DOV} – dovolený průhyb osy hřídele [mm]

Nyní je maximální průhyb hřídele menší, než dovolený, proto hřídel z hlediska průhybu vyhovuje.

REDUKOVANÉ NAPĚTÍ DLE PODMÍNKY HMH

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\sigma_0^2 + 3 \cdot \tau_k^2} = \sqrt{\left(\frac{32 \cdot M_{y1} \cdot \alpha_\sigma}{\pi \cdot d_{min}^3}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{16 \cdot M_{kB} \cdot \alpha_\tau}{\pi \cdot d_{min}^3}\right)^2} \quad [MPa] \quad (52)$$

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\left(\frac{32 \cdot 147117 \cdot 2}{\pi \cdot 30^3}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{16 \cdot 29700 \cdot 3}{\pi \cdot 30^3}\right)^2} = 111,425$$

$$\sigma_{RED} = 111,43 \text{ MPa}$$

Kde: M_{kB} – krouticí moment působící na buben [$N \cdot mm$]

d_{min} – minimální průměr hřídele [mm]

τ_k – napětí v krutu [MPa]

σ_0 – napětí v ohybu [MPa]

M_{y1} – ohybový moment v řezu 1 [$N \cdot mm$]

σ_{RED} – redukované napětí dle HMH [MPa]

α_τ – součinitel koncentrace napětí pro krut [–], dle [2, str. 1115]

α_σ – součinitel koncentrace napětí pro ohyb [–], dle [2, str. 1115]

BEZPEČNOST K MSP

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{RED}} \quad [-] \quad (53)$$

$$k = \frac{325}{111,43} = 2,916$$

$$k = 2,9$$

Vzhledem k bezpečnosti hřídele o průměru 30 mm předpokládám, že hřídel o průměru 45 mm bude mít vyšší bezpečnost, a proto hřídel z hlediska bezpečnosti vyhovuje.

Kde: R_e – mez kluzu pro ocel 11 600 [MPa], dle [31]

σ_{RED} – redukované napětí dle HMH [MPa]

BEZPEČNOST K MSÚ

Výpočty provedeny dle [2].

MEZ ÚNAVY ZKUŠEBNÍHO VZORKU

$$\sigma_{co} = 0,504 \cdot R_m \text{ [MPa]} \quad (54)$$

$$\sigma_{co} = 0,504 \cdot 600 = 302,4$$

$$\sigma_{co} = 302,4 \text{ MPa}$$

Kde: R_m – mez pevnosti pro ocel 11 600 [MPa], dle [31]

KORIGOVANÁ MEZ ÚNAVY

$$\sigma'_{co} = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot \sigma_{co} \text{ [MPa]} \quad (55)$$

$$\sigma'_{co} = 0,82 \cdot 0,86 \cdot 302,4 = 213,25$$

$$\sigma'_{co} = 213,25 \text{ MPa}$$

Kde: k_a – součinitel vlivu jakosti povrchu, dle [2, str. 345]

k_b – součinitel vlivu velikosti tělesa, dle [2, str. 345]

k_c – součinitel vlivu způsobu zatěžování, dle [2, str. 345]

k_d – součinitel vlivu teploty, dle [2, str. 345]

k_e – součinitel spolehlivosti, dle [2, str. 345]

k_f – ostatní vlivy, dle [2, str. 345]

σ_{co} – mez únavy zkušební vzorku

SOUČINITEL VRUBU

$$\beta_\sigma = \frac{\alpha_\sigma}{1 + \frac{2 \cdot (\alpha_\sigma - 1) \cdot \sqrt{a}}{\alpha_\sigma \cdot \sqrt{r}}} \text{ [-]} \quad (56)$$

$$\beta_\sigma = \frac{2}{1 + \frac{2 \cdot (2 - 1) \cdot 0,17}{2 \cdot \sqrt{0,4}}} = 1,58$$

$$\beta_\sigma = 1,58$$

$$\beta_\tau = \frac{\alpha_\tau}{1 + \frac{2 \cdot (\alpha_\tau - 1) \cdot \sqrt{a}}{\alpha_\tau \cdot \sqrt{r}}} \text{ [-]} \quad (57)$$

$$\beta_\tau = \frac{3}{1 + \frac{2 \cdot (3 - 1) \cdot 0,17}{3 \cdot \sqrt{0,4}}} = 2,21$$

$$\beta_{\tau} = 2,21$$

Kde: \sqrt{a} – Heywoodův parametr [–], dle [2]

r – poloměr křivosti [mm], dle [1, str. 467]

α_{τ} – součinitel koncentrace napětí pro krut [–], dle [2, str. 1115]

α_{σ} – součinitel koncentrace napětí pro ohyb [–], dle [2, str. 1115]

NORMÁLOVÉ A SMYKOVÉ NAPĚTÍ

$$\sigma_a = \beta_{\sigma} \cdot \sigma_{nom} = \beta_{\sigma} \cdot \frac{32 \cdot M_{y1}}{\pi \cdot d_{min}^3} \text{ [MPa]} \quad (58)$$

$$\sigma_a = 1,58 \cdot \frac{32 \cdot 147117}{\pi \cdot 30^3} = 87,69$$

$$\sigma_a = 87,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_m = \beta_{\tau} \cdot \tau_{nom} = \beta_{\tau} \cdot \frac{16 \cdot M_{kB}}{\pi \cdot d_{min}^3} \text{ [MPa]} \quad (59)$$

$$\tau_m = 2,21 \cdot \frac{16 \cdot 29700}{\pi \cdot 30^3} = 12,38$$

$$\tau_m = 12,4 \text{ MPa}$$

Kde: M_{kB} – krouticí moment působící na buben [$N \cdot mm$]

d_{min} – minimální průměr hřídele [mm]

M_{y1} – ohybový moment v řezu 1 [$N \cdot mm$]

β_{σ} – součinitel vrubu v ohybu [–]

β_{τ} – součinitel vrubu v krutu [–]

σ_a – amplituda napětí pro ohyb [MPa]

σ_m – střední napětí pro ohyb [MPa]

τ_a – amplituda napětí pro krut [MPa]

τ_m – střední napětí pro krut [MPa]

REDUKOVANÉ NAPĚTÍ

$$\sigma_{a,red} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3 \cdot \tau_a^2} \text{ [MPa]} \quad (60)$$

$$\sigma_{a,red} = \sqrt{87,7^2 + 3 \cdot 0^2} = 87,7$$

$$\sigma_{a,red} = 87,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,red} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3 \cdot \tau_m^2} \text{ [MPa]} \quad (61)$$

$$\sigma_{m,red} = \sqrt{0^2 + 3 \cdot 12,4^2} = 21,47$$

$$\sigma_{m,red} = 21,5 \text{ MPa}$$

Kde: σ_a – amplituda napětí pro ohyb [MPa]

σ_m – střední napětí pro ohyb [MPa]

τ_a – amplituda napětí pro krut [MPa]

τ_m – střední napětí pro krut [MPa]

BEZPEČNOST K MSÚ PRO SODERBERGOVO KRITÉRIUM**SMĚRNICE ZATĚŽOVACÍ PŘÍMKY**

$$r_1 = \frac{\sigma_{a,red}}{\sigma_{m,red}} [-] \quad (62)$$

$$r_1 = \frac{87,7}{21,5} = 4,07$$

$$r_1 = 4,07$$

Kde: $\sigma_{a,red}$ – redukovaná amplituda napětí [MPa]

$\sigma_{m,red}$ – redukované střední napětí [MPa]

SOUŘADNICE PRŮSEČÍKU SE SODERBERGOVOU PŘÍMKOU

$$\sigma_M = \frac{\sigma'_{co} \cdot R_e}{r_1 \cdot R_e + \sigma'_{co}} \text{ [MPa]} \quad (63)$$

$$\sigma_M = \frac{213,25 \cdot 325}{4,06 \cdot 325 + 213,25} = 45,22$$

$$\sigma_M = 45,22 \text{ MPa}$$

$$\sigma_A = \sigma_M \cdot r_1 \text{ [MPa]} \quad (64)$$

$$\sigma_A = 45,22 \cdot 4,06 = 183,58$$

$$\sigma_A = 183,58 \text{ MPa}$$

Kde: r_1 – směrnice zatěžovací přímky [–]

R_e – mez kluzu pro ocel 11 600 [MPa], dle [31]

σ'_{co} – korigovaná mez únavy [MPa]

SOUČINITEL BEZPEČNOSTI

$$k_{f1} = \frac{\sigma_A}{\sigma_{a,red}} \text{ [–]} \quad (65)$$

$$k_{f1} = \frac{183,58}{87,7} = 2,09$$

$k_{f1} = 2,09$ Hřídel je dostatečně dimenzovaná.

Kde: $\sigma_{a,red}$ – redukovaná amplituda napětí [MPa]

σ_A – souřadnice průsečíku se Soderbergovou přímkou

3.4.8 NÁVRH A KONTROLA PERA

Vzhledem k průměru a délce náboje elektromotoru volím pero dle [1] – 10e7 x 8 x 100 ČSN 02 2562.

DOVOLENÝ TLAK NA BOKU DRÁŽKY V NÁBOJI

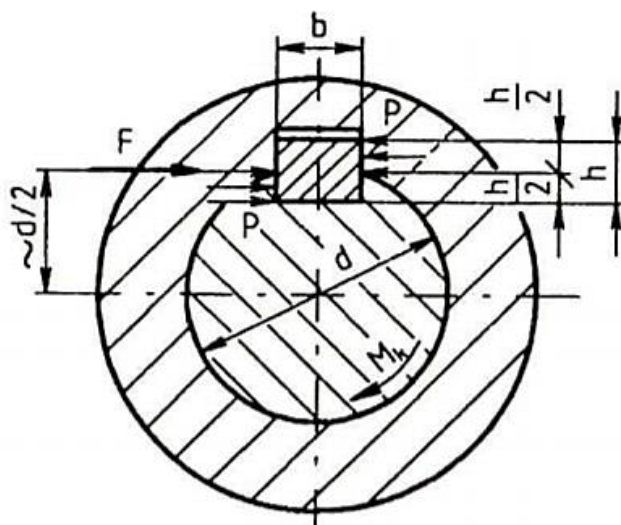
Výpočet proveden dle [2].

$$p_{DOV} = 0,7 \cdot p_0 \text{ [MPa]} \quad (66)$$

$$p_{DOV} = 0,7 \cdot 150 = 105$$

$p_{DOV} = 105 \text{ MPa}$ Vypočtený tlak je příliš vysoký, proto volím $p_{DOV} = 60 \text{ MPa}$.

Kde: p_0 – základní hodnota tlaku pro náboj [MPa], dle [2, str. 1081 tab. 18-8]



Obr. 40: Namáhání těsného pera [5]

OBVODOVÁ SÍLA NA POVRCHU HŘÍDELE

$$F_o = \frac{2 \cdot M_{kB}}{d_{min}} \quad [N] \quad (67)$$

$$F_o = \frac{2 \cdot 29700}{30} = 1980$$

$$F_o = 1980 \text{ N}$$

Kde: M_{kB} – kroučící moment působící na buben [$N \cdot mm$]

d_{min} – minimální průměr hřídele [mm]

TLAK PŮSOBÍCÍ NA PERO

$$p = \frac{F_o}{s} = \frac{F_o}{t_1 \cdot (l_p - b)} \leq p_{DOV} \quad [MPa] \quad (68)$$

$$p = \frac{1980}{3,3 \cdot (100 - 10)} = 6,67$$

$$p = 6,67 \text{ MPa}$$

$$p \leq p_{DOV} \quad \text{Vyhovuje podmínice.}$$

Kde: p_{DOV} – dovolený tlak na bocích drážek v náboji [MPa]

t_1 – hloubka drážky pro pero v náboji [mm], dle [1, str. 467]

F_o – obvodová síla na povrchu hřídele [N]

b – šířka drážky pro pero [mm], dle [1, str. 467]

l_p – délka pera [mm], dle [1, str. 467]

SOUČINITEL BEZPEČNOSTI DRÁŽKY PRO PERO

Hřídel je v místě drážky pro pero namáhána pouze krutem.

REDUKOVANÉ NAPĚTÍ DLE PODMÍNKY HMH

$$\sigma_{RED1} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 3 \cdot \tau_{max}^2} = \sqrt{0^2 + 3 \cdot \left(\alpha_\tau \cdot \frac{16 \cdot M_{kB}}{\pi \cdot d_1^3} \right)^2} \quad [MPa] \quad (69)$$

$$\sigma_{RED1} = \sqrt{0^2 + 3 \cdot \left(3 \cdot \frac{16 \cdot 29700}{\pi \cdot 25,3^3} \right)^2} = 48,53$$

$$\sigma_{RED1} = 48,5 \text{ MPa}$$

Kde: M_{kB} – krouticí moment působící na buben [N · mm]

d_1 – průměr hřídele zmenšený o hloubku drážky [mm]

α_τ – součinitel koncentrace napětí pro krut [–], dle [2, str. 1115]

SOUČINITEL BEZPEČNOSTI K MSP

$$k_1 = \frac{R_e}{\sigma_{RED1}} \quad [–] \quad (70)$$

$$k_1 = \frac{325}{48,5} = 6,7$$

$k_1 = 6,7$ Hřídel je v místě drážky pro pero dostatečně dimenzována.

Kde: R_e – mez kluzu pro ocel 11 600 [MPa], dle [31]

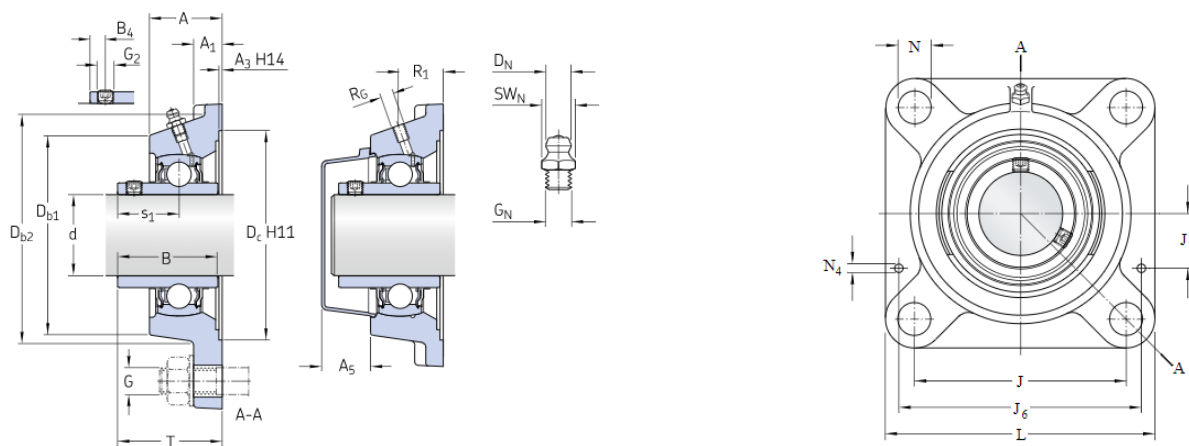
σ_{RED1} – redukované napětí dle HMH [MPa]

3.4.9 NÁVRH A TRVANLIVOST LOŽISEK

Pro tento typ magnetického separátoru jsem zvolil čtyři domečková ložiska dle [11]. Domečková ložiska neboli ložiskové jednotky se skládají z tzv. domečku a samotného ložiska. Konkrétně byly použity ložiskové jednotky s kuličkovými ložisky, ve kterých je uložen hřídel

hnacího a vratného bubnu. Tyto jednotky se označují jako přírubové ložiskové jednotky Y. Dle [11] mají vybrané ložiskové jednotky označení FY 35 TF (obr. 41). Ložiska ložiskových jednotek Y jsou opatřeny náplní lithného/vápenatého plastického maziva. Toto plastické mazivo je vhodné pro provozní teploty od -10 do $+120$ °C. Výhodou tohoto maziva jsou dobré protikorozní vlastnosti, odolnost proti vodě a dlouhá životnost i při vysokých zatížení. [12]

Při výpočtech ložisek je základní výpočtová trvanlivost ložiska L_{10h} uváděna pro ložiska vyráběná z obvyklých ložiskových materiálů, obvyklou kvalitu výroby a obvyklé provozní podmínky. Je to hodnota, kterou dosáhne nebo překročí 90% ložisek, než dojde k jejich únavovému poškození pittingem. [2] Doporučená hodnota požadované trvanlivosti ložisek vzhledem k typu stroje a provozu se pohybuje dle [12, str. 88] v rozmezí $L_D = 40000 \div 50000$ hod. Volím požadovanou trvanlivost ložiska B $L_D = 50000$ hod.



Obr. 41: Domečkové ložisko FY 35 TF [11]

DOVOLENÉ NATOČENÍ STŘEDNICE V LOŽISCÍCH DLE SKF

Dle [12] ložiskové jednotky Y umožňují vyrovnávat naklopením montážní nepřesnosti až do hodnoty: $\varphi_1 = 5^\circ = 0,087$ rad .

TRVANLIVOST LOŽISKA B V HODINÁCH

$$L_{10h} = \left(\frac{c}{F_{By} \cdot a_f} \right)^{a'} \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n_B} \text{ [hod]} \quad (71)$$

$$L_{10h} = \left(\frac{25500}{316,38 \cdot 1,5} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 168} = 2,6 \cdot 10^5$$

$$L_{10h} = 2,6 \cdot 10^5 \text{ hod}$$

Kde: a' – exponent pro ložiska s bodovým stykem [–], dle [12] pro kuličková ložiska $a' = 3$

n_B – otáčky bubnu [s^{-1}]

a_f – provozní součinitel [–], zvolen dle [2, str. 626 tab. 11-5]

F_{By} – radiální síla v ložisku B [N]

C – základní dynamická únosnost [N], dle [11]

TRVANLIVOST LOŽISKA B V OTÁČKÁCH

$$L_{10} = \left(\frac{C}{F_{By} \cdot a_f} \right)^{a'} \cdot 10^6 \text{ [ot]} \quad (72)$$

$$L_{10} = \left(\frac{25500}{316,38 \cdot 1,5} \right)^3 \cdot 10^6 = 1,55 \cdot 10^{11}$$

$$L_{10} = 1,55 \cdot 10^{11} \text{ ot}$$

Kde: a' – exponent pro ložiska s bodovým stykem [–], dle [12] pro kuličková ložiska $a' = 3$

a_f – provozní součinitel [–], zvolen dle [2, str. 626 tab. 11-5]

F_{By} – radiální síla v ložisku B [N]

C – základní dynamická únosnost [N], dle [11]

PODMÍNKA TRVANLIVOSTI LOŽISEK

$$L_{10h} > L_D \text{ [hod]} \quad (73)$$

$$2,6 \cdot 10^5 \text{ hod} > 50000 \text{ hod}$$

Kde: L_{10h} – trvanlivost ložiska B [hod]

L_D – doporučená trvanlivost ložiska B [hod]

Vypočtená trvanlivost ložiska je vyšší, než požadovaná, podmínka byla splněna.

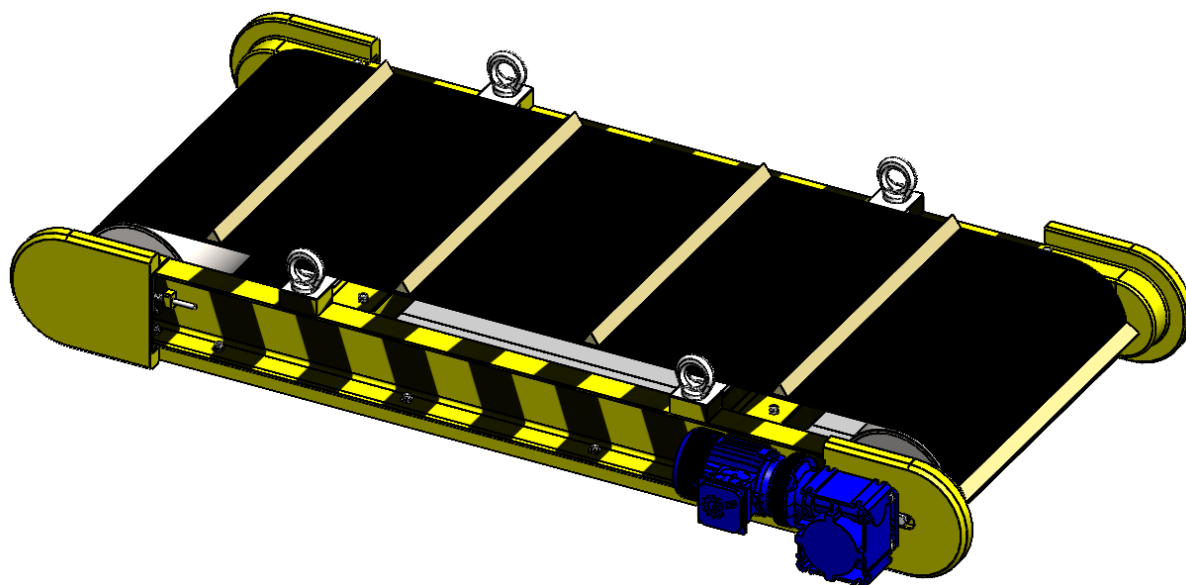
ZÁVĚR

Výsledkem této bakalářské práce je konstrukční návrh závěsného pásového separátoru s permanentními magnety. Samotnou práci lze rozdělit do dvou základních částí, a to rešeršní část, ve které byl proveden přehled nejčastějších typů magnetických separátorů, využívaných k separaci feromagnetického odpadu v různých odvětvích průmyslu. Tato část, také obsahuje přehled několika výrobců zabývajících se výrobou těchto zařízení.

Druhá část bakalářské práce se zaměřuje na výběr a posouzení konkrétního magnetického separátoru a návrh jeho konstrukce. Nejprve bylo nutné zvolit hlavní části magnetického separátoru, které byly popsány z hlediska jejich funkce a konstrukce. Dále byl proveden výběr materiálů, ze kterých budou hlavní části vyrobeny. V práci jsou také zmíněni výrobci, kteří zajistí dodání některých hlavních komponentů, jako např. bubny, motor atd. Každé z hlavních součástí použitých pro konstrukci tohoto magnetického separátoru je věnována samostatná podkapitola.

Jako další obsahuje tato práce výpočty hlavních konstrukčních uzlů magnetického separátoru, který je tvořen řadou vzorců, obrázků a schémat, bez kterých by nebylo možné návrh konstrukce realizovat. Tyto vzorce sloužily pro návrh vyráběných dílů a následně pro tvorbu jejich výkresové dokumentace. Z navržených dílů byla následně vytvořena sestava, jejíž výkresová dokumentace je spolu s výkresem rámu a hnacího hřídele součástí příloh této práce. Součástí příloh je také katalog, podle kterého bylo zvoleno pohonné ústrojí separátoru.

Při tvorbě této bakalářské práce byly využity dva druhy softwaru: MS Word pro textovou část a výpočty. Pro tvorbu modelů, sestavy a výkresů byl použit 3D modelovací program Solidworks.



Obr. 42: Závěsný pásový separátor s permanentními magnety

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. dopl. vyd. Albra, 2005, 914 s. 80-7361-033-7.
- [2] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978- 80-214-2629-0.
- [3] GAJDŮŠEK, Jaroslav a Miroslav ŠKOPÁN. *Teorie dopravních a manipulačních zařízení*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1988, 277 s.
- [4] ČSN ISO 5048. *Zařízení pro plynulou dopravu nákladů: Pásové dopravníky s nosnými válečky*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [5] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS, Jiří DVOŘÁČEK a František PROKEŠ. *Základy konstruování*. 4. vyd. CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [6] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a František PROKEŠ. *Výběry z norem*. 4. vyd. CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-751-2.
- [7] GTK. *Bubny pro pásové dopravníky*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.gtktuplesy.cz/index.php?page=bubny&language=cz>
- [8] GUMEX. *Pryžový dopravní pás*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/ep-3152-aa-pryzovy-dopravnikovy-pas-00866080>
- [9] FRAM. *Silentblok*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.rubber.cz/silentblok-s7530-typ-a-m12x37>
- [10] MATIS. *Upínací pouzdro samostředící*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.matis.cz/cs/produkt/klab-samostredici>
- [11] SKF. *Jednotky kuličkových ložisek*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/mounted-bearings/ball-bearing-units>
- [12] SKF. *Valivá ložiska*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000_1-CS_tcm_54-121486.pdf
- [13] *Feritové magnety*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Feritov%C3%BD_magnet
- [14] SELOS. *Magnetické materiály*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.magnety.cz/magneticke-materialy/>
- [15] NORD. *Šnekové převodovky*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.nord.com/cz/produkty/p%C5%99evodovky/%C5%A1nekov%C3%A9-p%C5%99evodovky/universal-%C5%A1nekov%C3%A9-p%C5%99evodovky.jsp>

- [16] MAGNETICKÉ SEPARÁTORY. CZ. *Magnetické separátory*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: https://magnetickeseparatory.cz/?gclid=CjwKCAiAsaOBBhA4EiwAo0_AnFuchfjeGQRjpTnNd3DmkLz0fi-KQvGUW117-I7naj9t8EHCR1iBEBocqEEQAvD_BwE
- [17] WAMAG. *Závěsné magnetické separátory*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.wamag.cz/produkty/zavesne-magneticke-separatory>
- [18] SELOS. *Magnetická separace*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.magnety.cz/magneticke-separatory/>
- [19] STEINERT. *Magnetická separace*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://steinertglobal.com/magnets-sensor-sorting-units/magnetic-separation/>
- [20] SOLLAU. *Magnetické separátory*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.sollau.cz/produkty>
- [21] BLS MAGNET. *Magnetická separace*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <http://www.blsmagnet.com/en/products/industrial-applications/magnetic-separation>
- [22] MAGNET-PRO. *Magnetické separátory*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <http://www.magnet-pro.cz/magneticke-separatory>
- [23] CONVEYORTEK. *Separace kovů*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://conveyortek.com/products?type=metal-separation>
- [24] MAGSY. *Magnetické separátory*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.magsy.cz/24669-magneticke-separatory-odlucovace-kovu>
- [25] COGELME. *Magnetické oddělovače*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.cogelme.eu/it-separatori-magnetici-overbelt/>
- [26] IMT. *Elektromagnetická separace*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.imt-inc.com/products/electromagnets/#about>
- [27] MALAMANT. *Elektromagnetické oddělovače*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.malamanctc.com/ferrous-metal-separation/overbelt-electromagnetic-separators/>
- [28] ACHENBACH. *Bubnové elektropohony*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: http://www.achenbach.cz/bubnove_elektropohony
- [29] OPIS. *Kuželočelní převodovky*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: http://www.prevodovky-bonfiglioli.cz/apres_cz.html
- [30] *Neodymové magnety*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.neodymove-magnety.cz/>

- [31] CZ FERRO STEEL. *Konstrukční ocel*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-11600.pdf>
- [32] *Oboustranně vetknutý nosník*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/42759770-Priklad-oboustranne-vetknuty-nosnik.html>
- [33] NORD. *Základní katalog převodovek, IE2*. [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: https://www.nord.com/cz/dokumentace/katalogy/details/g1000_ie2_50-hz.jsp

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	$[mm]$	Vzdálenost mezi osami ložisek
a'	$[-]$	Exponent pro ložiska s bodovým stykem
a_f	$[-]$	Provozní součinitel
\sqrt{a}	$[-]$	Heywoodův parametr
B_m	$[m]; [mm]$	Šířka magnetu
B_p	$[m]; [mm]$	Šířka pásu
b	$[mm]$	Šířka drážky pro pero
C	$[N]$	Základní dynamická únosnost
D_b	$[m]; [mm]$	Průměr bubnu
d_{min}	$[mm]$	Minimální průměr hřídele
d_0	$[mm]$	Navrhovaný průměr hřídele bubnů
d_1	$[mm]$	Průměr hřídele zmenšený o hloubku drážky
E	$[MPa]$	Modul pružnosti oceli v tahu
e	$[-]$	Eulerovo číslo
F_1	$[N]$	Tahová síla v nosné větvi
F_2	$[N]$	Tahová síla ve vratná větvi
F_{Ax}	$[N]$	Axiální síla v ložisku A
F_{Ay}	$[N]$	Radiální síla v ložisku A
F_{BG}	$[N]$	Síla od vlastní hmotnosti bubnu
F_{By}	$[N]$	Radiální síla v ložisku B
F_{bA}	$[N]$	Odpory setrvačných sil v místě nakládání a oblasti urychlování
F_{Dp}	$[N]$	Dovolená tahová síla
f_G	$[-]$	Globální součinitel tření zahrnující odpory pásu a bubnů
F_H	$[N]$	Hlavní odpory

F_l	[N]	Odpor ohybu pásu na bubnech
F_{max}	[N]	Největší tahová síla v pásu
F_N	[N]	Vedlejší odpory
F_{nap}	[N]	Napínací síla
F_o	[N]	Obvodová síla na povrchu hřídele
F_{pm}	[N]	Zvolený průměrný tah v pásu na bubnu
F_q	[N]	Síla od spojitého liniového zatížení
F_S	[N]	Skutečný tah v pásu
F_{Sx}	[N]	Tahová síla v ose X
F_{Sy}	[N]	Tahová síla v ose Y
F_T	[N]	Vektorový součet tahů v pásu na bubnu
F_t	[N]	Odpor v ložiscích hnaného bubnu
F_U	[N]	Obvodová hnací síla potřebná na poháněcím bubnu
F_{Umax}	[N]	Maximální obvodová síla
g	$[m \cdot s^{-1}]$	Tíhové zrychlení
h_m	[mm]	Výška magnetu
I_m	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní dopravní výkon
I_v	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	Objemový dopravní výkon
i	[-]	Navrhovaný převodový poměr
i_m	[ks]	Počet magnetů
i_{skut}	[-]	Skutečný převodový poměr
J_U	$[mm^4]$	Kvadratický moment v ohybu pro spojnicí
J_{y1}	$[mm^4]$	Kvadratický moment průřezu
k_1	[-]	Součinitel bezpečnosti k MSP pro drážku pro pero
k	[-]	Součinitel bezpečnosti k MSP
k_a	[-]	Součinitel vlivu jakosti povrchu

k_b	[-]	Součinitel vlivu velikosti tělesa
k_c	[-]	Součinitel vlivu způsobu zatěžování
k_d	[-]	Součinitel vlivu teploty
k_e	[-]	Součinitel vlivu spolehlivosti
k_f	[-]	Ostatní vlivy
k_{f1}	[-]	Součinitel bezpečnosti k MSÚ
k_n	[-]	Návrhový součinitel
k_p	[-]	Součinitel sklonu pásu
L_{10h}	[hod]	Trvanlivost ložiska B
L	[m]; [mm]	Délka magnetického separátoru
L_b	[m]; [mm]	Délka bubnu
L_D	[hod]	Doporučená trvanlivost ložiska B
L_m	[m]; [mm]	Délka magnetu
L_s	[m]; [mm]	Vzdálenost mezi osami bubnů
L_U	[m]; [mm]	Délka spojnice
m_b	[kg]	Hmotnost bubnu
M_{kB}	[N · mm]	Krouticí moment působící na buben
M_k	[N · mm]	Krouticí moment
m_{mcelk}	[kg]	Celková hmotnost magnetů
m_m	[kg]	Hmotnost jednoho magnetu
m_{mot}	[kg]	Hmotnost motoru
M_O	[N · mm]	Ohybový moment
M_{Omax}	[N · m]	Maximální ohybový moment působící na spojnici
$M_{O1/2}$	[N · m]	Ohybový moment působící uprostřed spojnice
m_p	[kg · m ⁻¹]	Hmotnost pásu

M_{y1}	$[N \cdot mm]$	Ohybový moment v řezu 1
n_B	$[s^{-1}]; [min^{-1}]$	Otáčky bubnu
n_{mot}	$[s^{-1}]; [min^{-1}]$	Otáčky hřídele elektromotoru
$n_{přev}$	$[min^{-1}]$	Otáčky na výstupu z převodovky
P	$[W]$	Potřebný provozní výkon pohonu magnetického separátoru
p_{DOV}	$[MPa]$	Dovolený tlak na bocích drážek v náboji
P_{mot}	$[W]$	Výkon elektromotoru
p_0	$[MPa]$	Základní hodnota tlaku pro náboj
Q	$[kg \cdot h^{-1}]$	Dopravované množství
q_B	$[kg]$	Hmotnost jednoho metru dopravního pásu
q_G	$[kg \cdot m^{-1}]$	Hmotnost dopravovaného materiálu na jeden metr pásu
q_m	$[N \cdot m^{-1}]; [kN \cdot m^{-1}]$	Spojité liniové zatížení od sestavy magnetů
r	$[mm]$	Poloměr křivosti
r_1	$[-]$	Směrnice zatěžovací přímky
R_e	$[MPa]$	Mez kluzu pro ocel 11 600
R_m	$[MPa]$	Mez pevnosti pro ocel 11 600
R_{mp}	$[N \cdot mm^{-1}]$	Pevnost pásu v tahu
S	$[m^2]$	Teoretický průřez materiálem
t_1	$[mm]$	Hloubka drážky pro pero v náboji
t_p	$[m]; [mm]$	Tloušťka pásu
v_0	$[m \cdot s^{-1}]$	Složka rychlosti dopravované hmoty ve směru pohybu pásu
v	$[m \cdot s^{-1}]$	Dopravní rychlost
W_k	$[mm^3]$	Modul průřezu v krutu
W_O	$[mm^3]$	Modul průřezu v ohybu
W_{OR}	$[mm^3]$	Modul průřezu v ohybu pro spojnicí
y_{DOV}	$[mm]$	Dovolený průhyb osy hřídele

y_{max}	[<i>mm</i>]	Maximální průhyb osy hřídele
α_o	[–]	Součinitel koncentrace napětí v ohybu pro rám
α_σ	[–]	Součinitel koncentrace napětí pro ohyb
α_τ	[–]	Součinitel koncentrace napětí pro krut
β_σ	[–]	Součinitel vrubu pro ohyb
β_τ	[–]	Součinitel vrubu pro okrut
η	[–]	Účinnost převodu
μ	[–]	Součinitel tření mezi poháněcím bubnem a pásem
ξ	[–]	Součinitel rozběhu
ρ_{ocel}	[<i>kg · m⁻³</i>]	Objemová hmotnost oceli
σ_a	[<i>MPa</i>]	Amplituda napětí pro ohyb
$\sigma_{a,red}$	[<i>MPa</i>]	Redukovaná amplituda napětí
σ_A	[<i>MPa</i>]	Souřadnice průsečíku se Soderbergovou přímkou
σ_{co}	[<i>MPa</i>]	Mez únavy zkušebního vzorku
σ'_{co}	[<i>MPa</i>]	Korigovaná mez únavy
σ_m	[<i>MPa</i>]	Střední napětí pro ohyb
$\sigma_{m,red}$	[<i>MPa</i>]	Redukované střední napětí
σ_M	[<i>MPa</i>]	Souřadnice průsečíku se Soderbergovou přímkou
σ_O	[<i>MPa</i>]	Napětí v ohybu
σ_{RED}	[<i>MPa</i>]	Redukované napětí dle HMH
σ_{RED1}	[<i>MPa</i>]	Redukované napětí dle HMH pro drážku pro pero
τ_a	[<i>MPa</i>]	Amplituda napětí pro krut
τ_k	[<i>MPa</i>]	Napětí v krutu
τ_m	[<i>MPa</i>]	Střední napětí pro krut
φ_1	[<i>rad</i>]	Dovolené natočení střednice v ložiscích
φ	[<i>rad</i>]	Úhel opásání poháněcího bubnu

SEZNAM PŘÍLOH

VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

- | | | | |
|---|-----------------------------|----------------------|------------------|
| - | Výkres sestavy: | MAGNETICKÝ SEPARÁTOR | 3-3B-STI/3-01/00 |
| - | Výkres sestavy (3D pohled): | MAGNETICKÝ SEPARÁTOR | 3-3B-STI/3-01/00 |
| - | Výkres rámu: | RÁM | 3-3B-STI/3-01/01 |
| - | Seznam položek: | RÁM | 3-3B-STI/3-01/01 |
| - | Výkres hnací hřídele: | HNACÍ HRÍDEL | 3-3B-STI/3-01/02 |