ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Stavba jaderně energetických strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh podávacího mechanismu pro zařízení na likvidaci čidel neutronového toku a termočlánků

Autor: **Bc. Lukáš Hrych**

Vedoucí práce: **Ing. Jan Zdebor, CSc.**

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: **2016/2017**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Lukáš HRYCH**
Osobní číslo:	**S15N0081P**
Studijní program:	**N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Stavba jaderně energetických zařízení**
Název tématu:	**Návrh podávacího mechanismu pro zařízení na likvidaci čidel neutronového toku a termočlánků**
Zadávající katedra:	**Katedra energetických strojů a zařízení**

Zásady pro vypracování:

Máte za úkol provést:

1. Recenzi současného stavu řešení.
2. Funkční analýzu a návrh konstrukčního řešení.
3. Konstrukční řešení a výběr optimální varianty, základní pevnostní ověření vybraného konstrukčního uzlu.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení navržené varianty.
5. Výkres sestavy s detaily jednotlivých důležitých uzlů a detailní konstrukční výkres jednoho z hlavních dílů, 3D vizualizace návrhu.

Rozsah grafických prací:	**10 - 20 stran**
Rozsah kvalifikační práce:	**50 - 70 stran**
Forma zpracování diplomové práce:	**tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- **Bečvář J. a kol.: Jaderné elektrárny, SNTL Praha, 1981**
- **Lamarsh J. R., Baratta A. J.: Introductionn to Nuclear Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 2001**
- **Technická dokumentace ŠKODA JS a.s.**
- **Krátký J., Hosnedl S.: Příručka strojního inženýra 1 a 2, Computer Press, Brno, 1999**

Vedoucí diplomové práce:	**Ing. Jan Zdebor, CSc.**
	Katedra energetických strojů a zařízení
Konzultant diplomové práce:	**Ing. Antonín Rudolf**
	Škoda JS a.s., Plzeň
Ostatní konzultanti:	**Ing. Václav Svoboda**
	Škoda JS a.s., Plzeň

Datum zadání diplomové práce:	**17. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce:	**2. června 2017**

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

L.S.

Dr. Ing. Jaroslav Synáč
vedoucí katedry

V Plzni dne 3. října 2016

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Hrych	Lukáš
STUDIJNÍ OBOR	Stavba jaderně energetických strojů a zařízení	
VEDOUCÍ PRÁCE	Ing. Zdebor, CSc.	Jan
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KKE	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	
NÁZEV PRÁCE	Návrh podávacího mechanismu pro zařízení na likvidaci čidel neutronového toku a termočlánků.	

FAKULTA	FST		**KATEDRA**	KKE		**ROK ODEVZD.**	2017

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	82		**TEXTOVÁ ČÁST**	70		**GRAFICKÁ ČÁST**	12

STRUČNÝ POPIS	Diplomová práce se zabývá návrhem podávacího mechanismu, respektive podávacího zařízení pro stroj na likvidaci použitých čidel neutronového toku a termočlánků. Zařízení je navrženo na čidla, která jsou používána na jaderné elektrárně Temelín.
KLÍČOVÁ SLOVA	Čidlo neutronového toku = KNI, termočlánek, kladka, radioaktivní záření, deformace

ANNOTATION FORM OF THE MASTER´S THESIS

AUTHOR	Hrych	Lukáš
FIELD OF STUDY	Design of Nuclear Power Machines and Equipment	
SUPERVISOR	Ing. Zdebor, CSc.	Jan
INSTITUTION	ZČU – FST – KKE	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	
TITLE OF THE WORK	Design of feed mechanism for device eliminating neutron flux detectors and thermocouples.	

FACULTY	Mechanical Engineering		**DEPARTMENT**	Power System Engineering		**SUBMITTED IN**	2017

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	82		**TEXT PART**	70		**GRAPHICAL PART**	12

BRIEF DESCRIPTION	The diploma thesis deals with the design of a feed mechanism, precisely feed device for a machine eliminating the used neutron flux detectors and thermocouples. The device is designed specifically for detectors used at the Temelín nuclear power plant.
KEY WORDS	Neutron flux detector = KNI, thermocouple, pulley, radioactive radiation, deformation

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojí Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne 1. 6. 2017 _____

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem pedagogům ze Západočeské univerzity v Plzni, kteří mi po dobu mého studia předávali nové znalosti, cenné připomínky a svou odbornou pomocí pomáhali při tvorbě této diplomové práce.

Především však patří dík vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Zdeborovi, CSc ze Škody JS a.s., a také KKE ZČU. Dále pak panu konzultantovi Ing. Antonínu Rudolfovi za obětavou pomoc při překonávání problémů a vstřícnost při poskytování informací potřebných pro sepsání diplomové práce.

V neposlední řadě, vlastně úplně v té první řadě, patří dík mé rodině, která mě po celou dobu studia velmi mnoho podporovala.

OBSAH

OBSAH 8
I. ÚVOD 1
II. ENERGETICKÉ ZAJISTĚNÍ 3
III. ZÁKLADNÍ POPIS ČESKÝCH JADERNÝCH ELEKTRÁREN 6
IV. ZÁKLADNÍ POPIS PRIMÁRNÍ OKRUHU VVER 1000 8
V. ŘETĚZOVÁ ŠTĚPNÁ REAKCE 9
VI. MODERÁTOR 10
VII. ŘÍZENÍ JADERNÉHO REAKTORU 11
VIII. MĚŘENÍ NA JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ 13
1) Diagnostická měření 13
2) Dozimetrická měření 13
3) Meteorologická měření 13
4) Seismická měření 13
5) Technologická měření 14
a) Teplotechnická měření 14
b) Neutronová měření 16
IX. ZAŘÍZENÍ NA LIKVIDACI ČIDEL NEUTRONOVÉHO TOKU A TERMOČLÁNKŮ 20
X. VSTUPNÍ INFORMACE 23
XI. VÝBĚR MECHANISMU PODÁVACÍHO ZAŘÍZENÍ 26
XII. KLADKOVÝ MECHANISMU 29
Pomocné výpočty 29
XIII. EXPERIMENTÁLNÍ POKUSY NA TRUBIČCE ČIDLA KNI 33
XIV. KONCEPTY MOŽNÝCH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ 37
1) První varianta 37
2) Druhá varianta 39
XV. VÝPOČTY NUTNÉ PRO SPRÁVNÉ NADIMENZOVÁNÍ CELÉ KONSTRUKCE 42
XVI. VÝPOČTY DEFORMACÍ METODOU MKP 59

Výpočtové modely (varianty) 59
Okrajové podmínky 60
Síť metody konečných prvků 62
Navržené varianty geometrie kladek 64
1. Varianta 64
2. Varianta 65
3. Varianta 66
4. Varianta 67
5. Varianta 68
6. Varianta 69
Deformační analýza 70
Vyhodnocení deformací u jednotlivých variant 72
XVII. VÝSLEDNÉ KOSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ CELÉHO PODÁVACÍHO ZAŘÍZENÍ . 73
XVIII. ZÁVĚR 75
SEZNAM OBRÁZKŮ 77
SEZNAM TABULEK 79
ZDROJE 80

I. ÚVOD

V dnešním světě je prakticky nepředstavitelné, jak bychom mohli fungovat bez elektrické energie. (Pozn. autora: spotřeba el. eng. se například oproti roku 1980 zvýšila přibližně o 30%, ovšem i celková populace se rozrostla asi o dalších 30%). Tato forma energie se stala pro člověka tak samozřejmou, že jsme na ni odkázáni daleko víc, než si myslíme. Nejedná se tedy pouze o dobíjení našich mobilních telefonů, či chytrých hodinek. Jde hlavně o daleko důležitější součásti našich životů, jako například napájení lékařských přístrojů, všech elektromotorů, dopravních prostředků a tak dále. [1]

Za získáváním této formy energie se nachází velmi mnoho práce a velké množství různých nápadů a myšlenek. Elektrickou energii lze získávat mnoha způsoby. V dnešní době je nejrozšířenější použití mechanické práce, která se v generátoru přetransformuje na elektrickou energii. A opět, způsobů, jakými lze získávat tuto mechanickou práci, je několik.

Jedním z těchto způsobů, je také využívání energie ukryté v uranové rudě. Energii získáváme štěpením jader uranu. Aby se nám celý tento proces podařilo realizovat, je k tomu zapotřebí celá jaderná elektrárna i s přidruženými provozy na výrobu jaderného paliva, uskladnění či přepracování použitého paliva atd. Přitom jenom jaderná elektrárna je velmi složité zařízení, které je v České republice provozováno pouze na dvou místech. Jedná se o jadernou elektrárnu Temelín a jadernou elektrárnu Dukovany. Obě tyto elektrárny využívají jaderné reaktory II. generace, ovšem s mnohými vylepšeními a opatřeními. Jedná se o reaktory VVER 1000 – V320 respektive VVER 440 - V213.

Abychom využili potenciál jaderné energie ukryté v uranu, je zapotřebí velmi složité a dlouhé cesty. Uranová ruda se těží, dále se přepracovává na jaderné palivo, které je ve formě peletek vkládáno do palivových proutků, souborů a nakonec vloženo do reaktoru. Hlavně z provozních, ale také z bezpečnostních důvodů je neustále monitorováno velké množství parametrů jak v primárním okruhu jaderné elektrárny, tak i ve všech jejích ostatních částech a i přidružených provozech. Tato měření jsou součástí několika vyhodnocovacích systémů, které zabezpečují bezpečný a ekonomicky výhodný provoz jaderných elektráren. Tyto systémy pracují buď online, za provozu nepřetržitě, nebo případech žádajících si to předpisy na elektrárně. Některá měření a kontroly jsou možné provádět pouze při odstávkách. Takto periodicky kontrolovaná komponenta je například tlaková nádoba reaktoru.

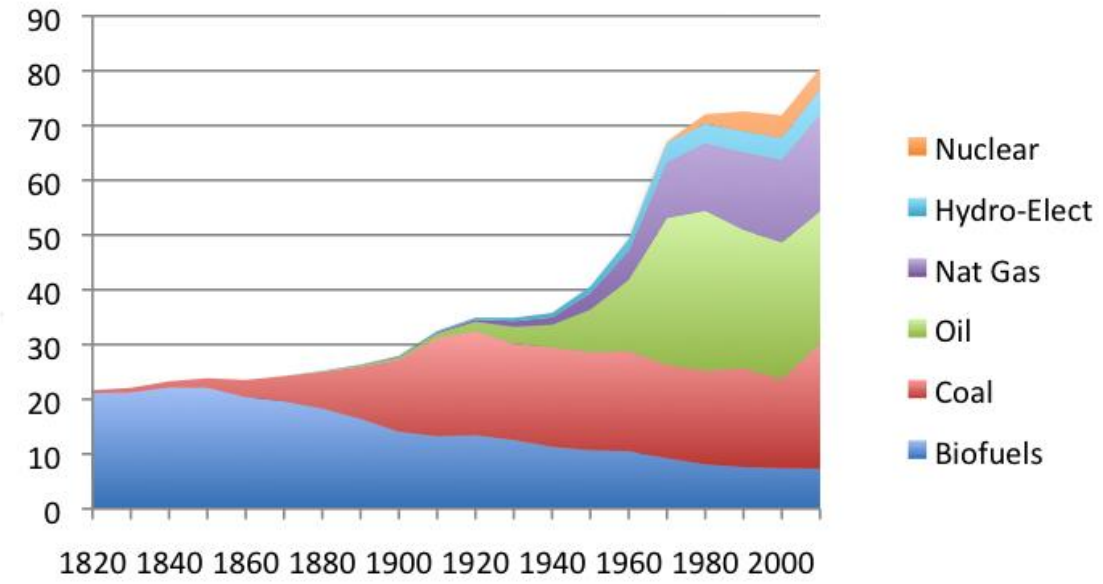
Tato velmi důležitá část primárního okruhu, která se dnes považuje za jedinou nevyměnitelnou komponentu na jaderné elektrárně, je pečlivě sledována. Tlaková nádoba reaktoru si zaslouží naši největší pozornost a je potřeba se o ni co možná nejhospodárněji starat. Zajistit co nejnižší namáhání od tlaku, hlavně při tlakových zkouškách, dále pak snížit na minimum teplotní šoky, kterými nádoba musí projít a také co možná nejvíce minimalizovat křehnutí tlakové nádoby reaktoru od neutronového toku.

Dostatečný neutronový tok je základem ke vzniku štěpné reakce. Neutrony totiž svou interakcí s jádry uranu 235 způsobují štěpení tohoto jádra. Aby štěpení probíhalo správně, jak je žádáno, musí se měřit a hlídat, jaký neutronový tok v jednotlivých oblastech jaderného reaktoru máme. Toto měření je velmi složitá záležitost, neprobíhá pouze v prostoru mimo tlakovou nádobu reaktoru, ale i přímo v prostoru jaderného reaktoru, (tzv. InCore měření) při parametrech primárního okruhu. Výsledky tohoto měření je nutné vyvést ven a zpracovat je.

Neutronový tok se měří pomocí detektorů. Jedním z druhů těchto detektorů jsou čidla na měření neutronového toku – KNI. Zkratka KNI znamená kanál na měření neutronového toku. Jedno z provedení těchto čidel je zkonstruováno do nerezových trubiček. Tyto trubičky vedou skrze celou aktivní zónu, a tudíž za dobu své životnosti do sebe pojmou velké množství radioizotopů a stanou se radioaktivním zářičem. Úkolem této diplomové práce je navrhnout podávací zařízení, které bude tyto čidla podávat do zařízení na jejich likvidaci.

II. ENERGETICKÉ ZAJISTĚNÍ

Hlavním úkolem je získat elektrickou energii! Udržet napětí na 50 Hz ve spotřebitelské síti! Minimalizovat cenu na 1 KWh!



Obr. 1: Světová spotřeba el. energ. na člověka za rok v [GJ] [8]

V dnešní době jsou tyto a mnohé další důležité úkoly realizovány hlavně pomocí tepelných elektráren, které spotřebovávají různě kvalitní uhlí. Tento druh elektráren dokáže bez větších technických problémů všem úkolům vyhovět, avšak jsou s ním spojeny jiné druhy problémů. Zásoby uhlí nejsou nekonečné, dokonce se v poslední době v mnoha státech včetně České republiky zavádějí těžební limity, které již nebude možné v nejbližší době prolomit. Dalším hlavním a úzce spjatým problémem je vztah těchto elektráren k životnímu prostředí. Ještě před pár lety byl popílek ze spalování spolu oxidy CO_2, SO_2 apod. vypouštěn přímo do komína a do ovzduší. V posledních přibližně dvou desetiletích se situace na tepelných elektrárnách znatelně zlepšila a to díky elektrostatickým nebo látkovým filtrům a také díky odsiřovacím jednotkám. Tyto zařízení velice snižují koncentrace popílku a SO_2 unikajícího do ovzduší. Ovšem nesnižují hodnoty produkovaného CO_2.

Oproti tomuto způsobu získávání energie stojí naopak úplně „čistá“ energie z obnovitelných zdrojů. K této cestě se v dnešní době začíná přiklánět čím dál tím větší část světa, v některých státech se již můžeme bavit o více než padesáti procentech celkové vyráběné energie. Energie z vodních elektráren, fotovoltaických elektráren a větrných elektráren zatěžuje životní prostředí pouze nečistotami vzniklými při své výrobě a pak při své případné likvidaci (Pozn. autora – i když ani tyto hodnoty nejsou rozhodně zanedbatelné). Po dobu své životnosti pak přímo tato zařízení již další emise neprodukují. Bohužel, zatím pomocí těchto zdrojů není celosvětově možné splnit hlavní úkoly, které se od elektráren žádají a tím splnit poptávku.

Za jakýsi kompromis mezi těmito dvěma metodami můžeme považovat jadernou energetiku. Nejedná se ovšem o kombinaci dvou předešlých způsobů, ale o zcela odlišný a samostatný přístup k získávání energie.

Jaderné elektrárny se v mnohém shodují s tepelnými. Způsob získávání paliva je v dnešní době shodný – těžba, způsob převodu tepelné energie na elektrickou je také totožný – realizace pomocí parních turbín a nakonec i výkony obou druhů elektráren jsou v podobných rozsazích. Hlavní rozdíl se odehrává v množství energie uschované ve vytěžené rudě uranu oproti uhlí. Na vyrobení stejného množství tepelné či elektrické energie je zapotřebí o mnoho více uhlí než uranu.

Palivo	Výhřevnost MJ/kg
Černé uhlí (ČEZ v r.1994)	21,3
Hnědé uhlí (ČEZ v r.1994)	11,4
Suché dřevo	16
Benzín	42,7
Petrolej	44,4
Vodík	95,5
Jaderné palivo firmy WEC pro JE[1] Temelín	cca 45 MWd/kg = 3,9 $.10^6$ MJ/kg

Tab. 1: Výhřevnost různých materiálů. [23]

A tím se dostáváme i k bodům, které má jaderná elektrárna shodné s elektrárnami na obnovitelné zdroje. Jaderná elektrárna při svém provozu nevypouští téměř žádné emise do životního prostředí. Z chladících věží se valí pouze pára a veškerá zařízení, kromě záložních diesel agregátorových stanic, jsou poháněna elektřinou, kterou sama elektrárna vyrobí. Odpad, který ovšem zatím jaderné elektrárny produkují je tzv. vyhořelé palivo. Ovšem již dnes je ve všech moderních projektech zahrnuté tzv. palivo MOX. MOX je palivo pro jaderné elektrárny, které vzniká přepracováním již vyhořelého paliva. Tyto přepracovací závody již na světě existují a pracují například ve Velké Británii, Francii, Rusku, Číně nebo USA. Mimo to, se mnoho vědců snaží najít další způsob využití pro tento použitý materiál. A to hlavně z důvodu, že samotná štěpná reakce využije pouze 4% z celkové energie uschované v jaderném palivu. Existují například studie na využití v tzv. diamantových bateriích [10] a další.

Co je ale také hlavní výhodou jaderných elektráren? Dokáží dodávat elektrickou energii konstantně a tím zajistit požadovanou frekvenci v síti. Po počátečních investicích do výstavby se pak již provozní náklady příliš neliší od tepelných elektráren. A pokud by bylo jaderných elektráren dostatek, dokáží zajistit minimálně stejné množství energie, jaké produkují tepelné elektrárny. Jaderná energetika s sebou ovšem také nese určitá úskalí. Hlavním parametrem se zde stává bezpečnost. Na moderních jaderných elektrárnách jsou

[1] JE = jaderná elektrárna

bezpečnostní systémy několikanásobně jištěny. Nebezpečnost se ovšem skrývá v tom, že škodlivé jaderné záření není vidět. Tato práce by se ale neměla zabývat bezpečností jaderných elektráren, proto zpět k technickým parametrům, provedením a specifikacím.

Ve zkratce se tedy jedná o ekologický, ale přitom stálý a spolehlivý zdroj elektrické energie. Tedy o velmi dobré řešení pro uspokojení poptávky a splnění výše nastíněných úkolů dnešní energetiky.

Jak tedy taková jaderná elektrárny vypadá?

III. ZÁKLADNÍ POPIS ČESKÝCH JADERNÝCH ELEKTRÁREN

V České republice stojí v současné době šest jaderných bloků. Jsou to, 1. - 4. blok Jaderné elektrárny Dukovany a 1. a 2. blok Jaderné elektrárny Temelín. Všechny tyto bloky vycházejí z projektů ruských jaderných elektráren s označením VVER.

EDU: VVER 440/V-213

ETE: VVER 1000/V-320

Tak jak byly tyto elektrárny naprojektovány a postaveny, byly dnes řazeny do tzv. II. generace jaderných bloků. Ovšem u obou nich bylo provedeno mnoho úprav a opatření. Dnes, po dokončení „pofukušimských“ opatření lze tvrdit, že se řadí do generace III.

Oba typy VVER 440 i VVER 1000 jsou tlakovodními reaktory. Jejich primárním i sekundárním médiem je lehká voda H_2O. Chemické složení této vody je velice pečlivě upravováno v chemických úpravnách vod na elektrárnách. V primárním okruhu je v této vodě vždy rozpuštěno určité procento roztoku kyseliny borité – jako absorbátor.

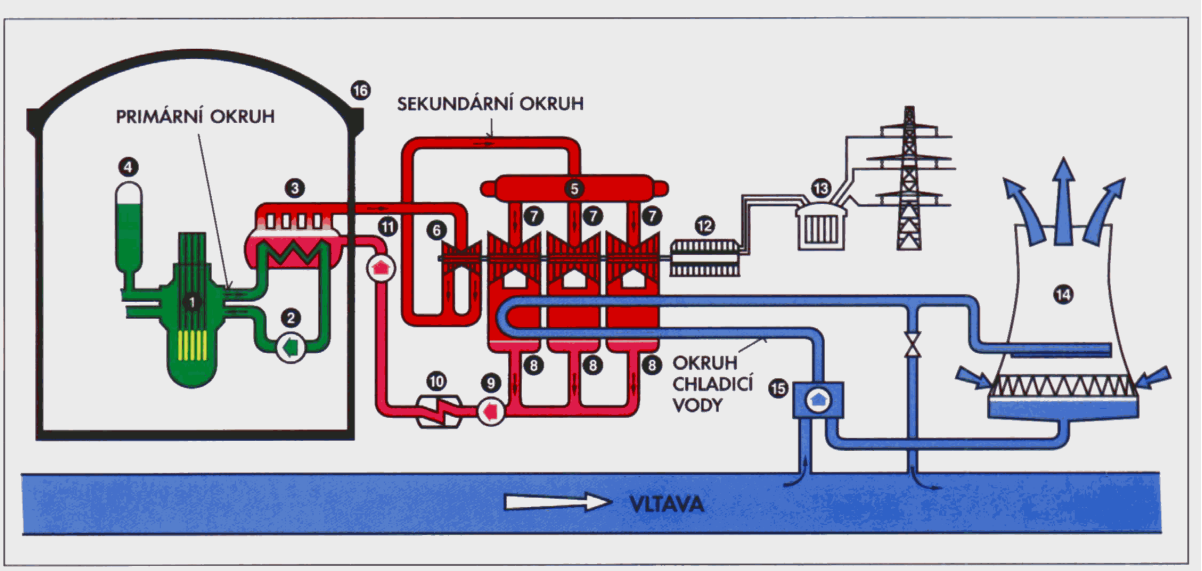


SCHÉMA JE TEMELÍN: **1.** Reaktor, **2.** Hlavní cirkulační čerpadlo, **3.** Parogenerátor, **4.** Kompenzátor, **5.** Separátor - přihřívák, **6.** Vysokotlaký díl turbíny, **7.** Nízkotlaký díl turbíny, **8.** Kondenzátor, **9.** Kondenzátní čerpadlo, **10.** Regenerace, **11.** Napájecí čerpadlo, **12.** Elektrický generátor, **13.** Transformátor, **14.** Chladicí věž, **15.** Čerpací stanice, **16.** Ochranná obálka

Obr. 2: Schéma JE Temelín [21]

Dle obrázku je vidět, že se JE skládá ze třech základních okruhů. Je zde primární okruh, který zjednodušeně tvoří jaderný reaktor, kompenzátor objemu, primární část parogenerátoru, hlavní cirkulační čerpadlo a hlavní cirkulační potrubí. V sekundární části pak vidíme klasické komponenty jako na tepelných elektrárnách. Zásadní rozdíl od tepelných elektráren je ten, že pára, která se generuje v parogenerátorech, je pouze mírně nad mezí sytosti, a nikoli v přehřátém stavu. Proto je do sekundárního okruhu zařazen separátor-přihřívač, který po částečné expanzi páry ve vysokotlakém díle turbíny odseparuje vlhkost, přihřeje páru do přehřátého stavu a posílá ji na další expanzi. Odtud pak jde pára do kondenzátoru a přes kondenzátní čerpadlo, napájecí nádrž, regeneraci a napájecí čerpadlo se vrací zpět do parogenerátoru. Poslední, terciální, okruh slouží k dochlazování kondenzátu a tím vzniku podtlaku v kondenzátoru. Díky velmi nízkému tlaku v kondenzátoru se prodlouží expanze páry a to vede k většímu zisku energie z páry. Teplo, které je předáno terciálnímu médiu, opět lehká voda, je odevzdáváno do atmosféry buď v chladicích věžích, nebo dochlazovacích bazénech.

Na Jaderné elektrárně Dukovany má každý blok k sobě dva turbogenerátory o původním společném výkonu 440 MW. V dnešní době se pomocí mnoha modernizací podařilo dosáhnout společného výkonu přes 500 MW.

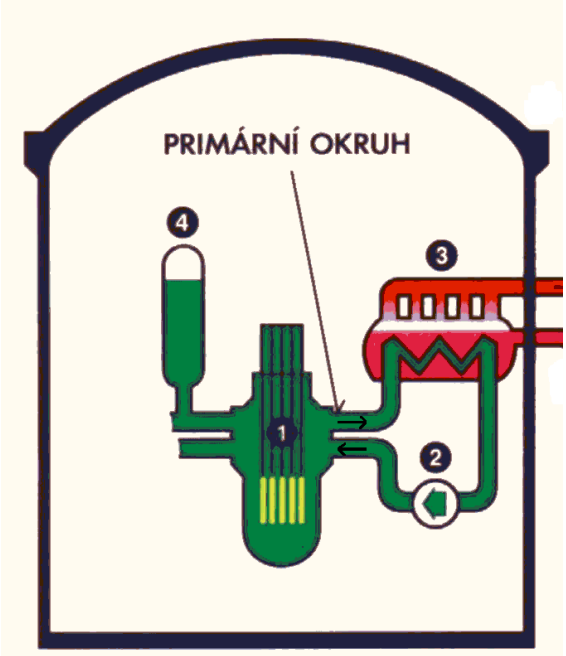
Jaderná elektrárna Temelín ovšem také prodělala mnoho vylepšení, například u nízkotlakých turbínových stupňů se dříve používalo čtyř stupňové uspořádání, oproti dnešnímu pěti stupňovému. I tím se instalovaný výkon zvedl z 980 MW na 1081 MW.

Podle obrázku je zřejmé, že pára pohánějící turbosoustrojí se generuje v parogenerátoru. Do PG[2] nám na primární straně vstupuje ohřátá voda z reaktoru. Jak se ale tato voda v jaderném reaktoru ohřívá?

[2] PG = parogenerátor

IV. ZÁKLADNÍ POPIS PRIMÁRNÍ OKRUHU VVER 1000

Popis primárního okruhu je naznačen na následujícím obrázku. Hlavní je zde nádoba tlakovodního reaktoru (1), ke které jsou připojeny celkem 4 smyčky. Na každé smyčce se nachází jeden parogenerátor (3), kde se teplo předává do sekundárního okruhu. Za parogenerátorem je hlavní cirkulační čerpadlo (2). Toto čerpadlo dodává proudícímu médiu kinetickou energii, pro zajištění dostatečného průtoku primárním okruhem, přesněji skrze aktivní zónu jaderného reaktoru. Na jedné smyčce, konkrétně na její horké větvi, to znamená mezi reaktorem a parogenerátorem, se nachází kompenzátor objemu (4). Tato tlaková nádoba slouží k regulaci tlaku v celém primárním okruhu.

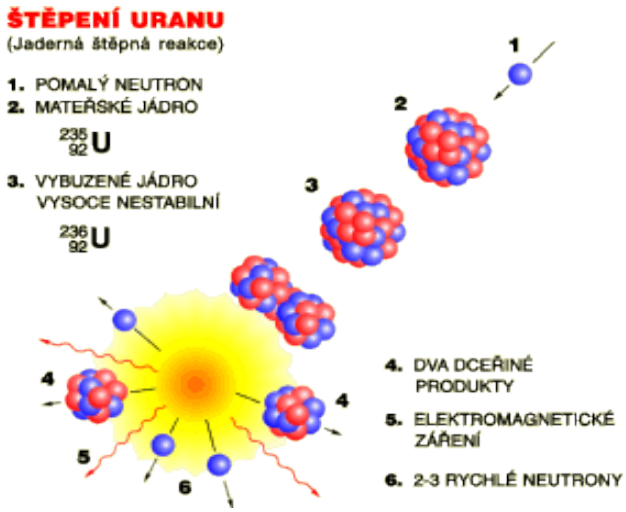


Obr. 3: Schéma primárního okruhu JE [21]

Jak již bylo řečeno, v jaderném reaktoru se médium primárního okruhu ohřívá. Toto teplo se pak v parogenerátoru předává pracovnímu médiu v okruhu sekundárním. Ohřátí primárního média je v případě Temelínských bloků o 30°C až na konečnou teplotu kolem 319 °C. Aby při takto vysokých teplotách nedocházelo k možnosti vzniku varu vody, je tlak v primárním okruhu nastaven na 15.6 MPa. Kde se ale bere energie na toto ohřátí? [5]

V. ŘETĚZOVÁ ŠTĚPNÁ REAKCE

Odpověď zní – ze štěpení. Jak je možno vidět na následujícím obrázku, při štěpení jádra U^{235} vznikají nejen štěpné produkty, v podobně většinou dvou prvků a v průměru 2-3 rychlých neutronů, ale také se uvolňuje značné množství energie. Na jedno štěpení je to přibližně 200 MeV což je asi $3{,}4 \times 10^{-11}$ J. Tato energie je předána médiu, v našem případě vodě, která proudí skrze celou aktivní zónu. Aktivní zóna – to je ta část jaderného reaktoru, kde probíhá řetězová štěpná reakce.



Obr. 4: Příklad řetězové štěpné reakce [22]

Aby se řetězová reakce stala řetězovou, a zároveň aby byla řiditelná, je potřeba udržet tzv. kritický stav reaktoru. Kritický stav znamená, že počet neutronů jedné generace lomený počtem neutronů generace předcházející je roven jedné. Jedná se o tzv. efektivní koeficient násobení, neboli efektivní multiplikační koeficient k_{ef} :

$$k_{ef} = \frac{M_N}{M_{N-1}}$$

Kde: M_N =Množství neutronů dané generace

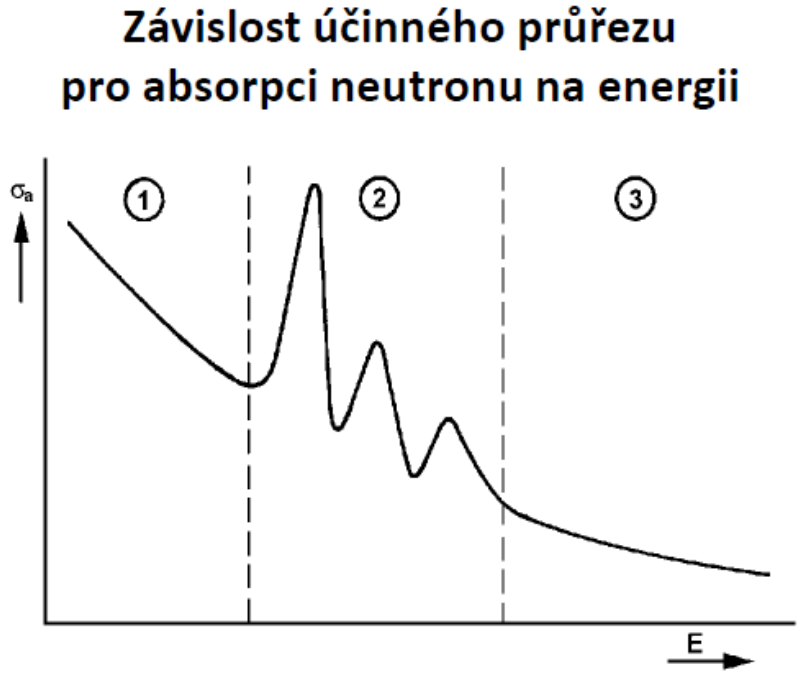
M_{N-1} =Množství neutronů generace předcházející

Kritický stav reaktoru je takový stav, kdy se $k_{ef} = 1$. To znamená, že z jednoho štěpení se právě jeden neutron uplatní a způsobí další štěpení. Do tohoto výpočtu jsou zahrnuty všechny ostatní vlivy na vznik štěpné reakce. Jako například regenerační faktor (počet rychlých neutronů uvolněných při štěpné reakci), pravděpodobnost štěpení tepelnými neutrony, koeficient násobení rychlými neutrony, absorpce v U^{238}, koeficient využití tepelných neutronů, koeficient absorpce štěpnými produkty…

To znamená, že pokud se při štěpné reakci uvolní v průměru 2,33 neutronů, v průměru 1,33 neutronů se dále nevyužije na štěpení jader U^{235}. Tyto neutrony mohou například uniknout ze soustavy, zachytit se v absorbátoru, nebo ve stěně tlakové nádoby reaktoru, anebo jsou neproduktivně pohlcena v produktech již rozštěpeného paliva, které se dál nerozpadá. [8]

VI. MODERÁTOR

Moderátor je v tlakovodním reaktoru opět klasická lehká voda H2O. Je to tedy stejné médium, které je použito jako chladivo. Moderátor - jeho první funkcí je zpomalit rychlé neutrony do tepelné oblasti, aby se tyto neutrony mohli účastnit štěpení jader uranu a reaktor se tak mohl ustálit na kritickém stavu. Neutrony, které se uvolní ze štěpné reakce, popřípadě z nestabilních prvků, jsou tzv. „rychlé“. Tyto neutrony je zapotřebí vhodným způsobem zpomalit do energetické oblasti tzv. „tepelných“ neutronů. V této oblasti mají totiž neutrony největší účinný průřez a tím i nejvyšší pravděpodobnost, že dojde k dalšímu štěpení U^{235}.



Obr. 5: Závislost účinného průřezu pro absorpci neutronu (σ_a) na energii (E). [9]

1. Oblast do 1eV.
2. Rezonanční oblast 1eV – 10^3eV.
3. Oblast neutronů s velkou energií 10^3eV – 10^7eV.

Moderátor, tedy voda = molekuly H_2O, zapříčiňuje srážkami s rychle letícími neutrony jejich zpomalení a předání kinetické energie. Tím se neutrony zpomalí a může docházet k dalším štěpným reakcím. Zároveň se ohřívá moderátor = voda v primárním okruhu a tím se dostáváme k druhé funkci moderátoru. Je to přesun tepla, vznikajícího ze štěpení, z aktivní zóny do parogenerátorů.

Víme tedy, jakým způsobem je teplo předáváno z paliva až do sekundárního okruhu jaderné elektrárny. Jak se ale reguluje množství tepelné energie, které je právě pro naše účely vhodné? Jak se vlastně takový reaktor řídí?

VII. ŘÍZENÍ JADERNÉHO REAKTORU

Štěpná reakce je velmi rychlý děj, který se při nesprávné regulaci může exponenciálně rozrůstat. Neutrony vznikající v jaderném reaktoru se mohou uvolnit buď přímo ze štěpení, tzv. okamžité neutrony, anebo s určitým zpožděním, od desetin sekundy až po desítky sekund, ze štěpných produktů. Tyto neutrony se pak nazývají zpožděné neutrony.

Pro udržení kritického stavu reaktoru, je tedy zapotřebí, mít možnost regulovat množství neutronů, které se zúčastní dalšího štěpení.

K tomu nám v reaktoru slouží regulační orgány. Ty v sobě obsahují absorbátor. To je takový materiál, který je schopný pohltit letící neutron, aniž by došlo k jeho dalšímu rozpadu. Mezi typické absorbátory patří Bór, Kadmium nebo třeba Gadolinium. Poslední jmenovaný je hojně využíván jako tzv. vyhořívající absorbátor. Ten se používá k dosažení konstantního průběhu vyhořívání paliva po celou dobu kampaně. Tento prvek může být například přidán do klasické palivové tyče, aby v počátku kampaně kompenzoval její vyšší míru obohacení oproti tyčím v jejím okolí. Vyhořívající absorbátor po určité době zcela vyhoří, a jeho vliv vymizí.

K regulaci neutronů tedy hlavně slouží jednak bór, ve formě kyseliny borité, která je rozpuštěna ve vodě primárního okruhu. A také regulační tyče, které jsou řízené operátorem a mohou se zasouvat nebo vysouvat z aktivní zóny.

Kyselina boritá je ve vodě primárního okruhu, při odstávce jaderné elektrárny Temelín, nasycena asi na 12g na 1kg vody. Této koncentraci se říká odstavná koncentrace, protože veškeré neutrony je schopný pohltit bór a tím zabránit rozvoji štěpné reakci. Tato odstavná koncentrace je pro každou tlakovodní elektrárnu počítána extra, protože zde záleží na geometrii aktivní zóny, množství paliva a dalších parametrech. Dále v průběhu kampaně se snižuje koncentrace kyseliny borité, pomocí vodovýměny, v primárním chladivu až na téměř nulovou hodnotu. Kyselina boritá je také důležitá při dosahování kritičnosti reaktoru.

Regulační tyče mají stejný tvar jako palivové, jsou rozmístěny na 61 místech v reaktoru VVER 1000 a jsou rozděleny do deseti skupin. Všechny tyto tyče jsou napojeny na lineární krokové pohony, které umožňují každou skupinou tyčí pohybovat dle potřeb operátora. V případě rychlého odstavení reaktoru je připraveno všech těchto 61 tyčí k okamžitému pádu do aktivní zóny, a tím k postupnému zastavení štěpné reakce. Při normálním provozu je ovšem prvních devět skupin zcela vytaženo nad aktivní zónu reaktoru a pouze desátá skupina, která obsahuje celkem 7 regulačních tyčí, je částečně zasunuta do aktivní zóny. A pomocí této poslední skupiny je celý reaktor a tím i neutronový tok řízen.

V reaktoru je tedy nutné stále hlídat neutronový tok, tedy efektivní koeficient násobení k_{ef}. Uhlídat ovšem tuto hodnotu na okamžitých neutronech je nereálné, z důvodu velmi krátkých časů jejich uvolňování. Proto se reaktor řídí na zpožděných neutronech. Tyto

neutrony zaujímají pouze malou část (0,67%) ze všech neutronů v aktivní zóně. Ovšem i méně než 1% neutronů stačí k celkové kontrole nad štěpnou reakcí. Průměrná doba zpoždění všech skupin zpožděných neutronů je přibližně 0,1s.

Dalšími velice důležitými parametry jsou výkon reaktoru a teplota chladiva. Pro správné řízení reaktoru je tedy zapotřebí znát velmi mnoho aktuálních údajů o stavu celé elektrárny. Tyto měření se provádějí v reálném čase a jsou transportovány do systému kontroly a řízení, dále na blokovou dozornu, nouzovou blokovou dozornu a také do jednotlivých ochranných systémů a zařízení, kde se vyhodnocují. [1]

VIII. MĚŘENÍ NA JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ

V současné době se na jaderných elektrárnách měří velice mnoho parametrů a veličin. Proto zde je uvedeno jejich základní rozdělení:

1) Diagnostická měření
2) Dozimetrická měření
3) Meteorologická měření
4) Seismická měření
5) Technologická měření

Nyní zde budou podrobněji popsány jednotlivé druhy měření:

1) Diagnostická měření

Slouží pro sledování stavu zařízení z pohledu životnosti. Jde o zjišťování možných poruch jednotlivých komponent na elektrárně. Jsou zde zahrnuty metodiky nedestruktivních zkoušek, akustická emise, sledování počtu cyklů a také vizuální kontroly. V místech, kde se jedná o vysoce radioaktivní prostředí, se používají kamery s online přenosem obrazu.

2) Dozimetrická měření

Dozimetrická měření kontrolují, zda nedochází k úniku radioaktivního záření tam, kde by být nemělo. Dozimetristé jsou osoby, které vždy doprovází ostatní lidi při vstupu do potencionálně nebezpečných prostorů. I v tomto druhu měření se vyhodnocují velké množství čidel na měření radioaktivity vně i uvnitř elektrárny. V případě havárie dozimetristé velmi úzce spolupracují s meteorology.

3) Meteorologická měření

Jsou pro nás důležitá hlavně v případě havárie, kdy se sleduje a předpovídá pohyb případných radioaktivních úniků do životního prostředí. V okolí jaderných elektráren mají několik desítek měřících zařízení, které s pravidelností vyhodnocují.

4) Seismická měření

Tyto měření slouží hlavně pro bezpečné provozování jaderné elektrárny a její varování před seismickou událostí. Pokud by tato situace nastala, automatický systém kontroly a řízení zareaguje na seismickou aktivitu příslušným snížením výkonu reaktoru, nebo přímo odstavením reaktoru.

5) Technologická měření

Tento typ měření slouží pro sledování, či řízení, technologického procesu. Z technického hlediska jsou to ty nejdůležitější měření na jaderné elektrárně. Dají se dělit do těchto skupin:

a) Teplotechnická měření

Do tohoto druhu měření se řadí hlavně měření teplot, tlaků, výšky hladin a hodnoty průtoků. Teploty se měří pomocí termočlánků nebo odporových teploměrů. Tlak je možné měřit pomocí tlakových čidel, clon anebo membránami.

Z pohledu této diplomové práce nás nejvíce zajímají právě termočlánky, pro které je naše zařízení konstruováno. Termočlánky slouží k měření teploty v jaderné energetice i v ostatních průmyslových oborech. Termočlánky se vyrábějí v mnoha provedeních a specifikacích. Na jaderných elektrárnách v České Republice jsou použity termočlánky s minerální izolací. Hlavní účel jejich použití je pro sledování tzv. „zásoby do bodu varu“. Kontroluje se tím případné narušení hermetičnosti, které by mohlo vzniknout při přehřátí palivového proutku.

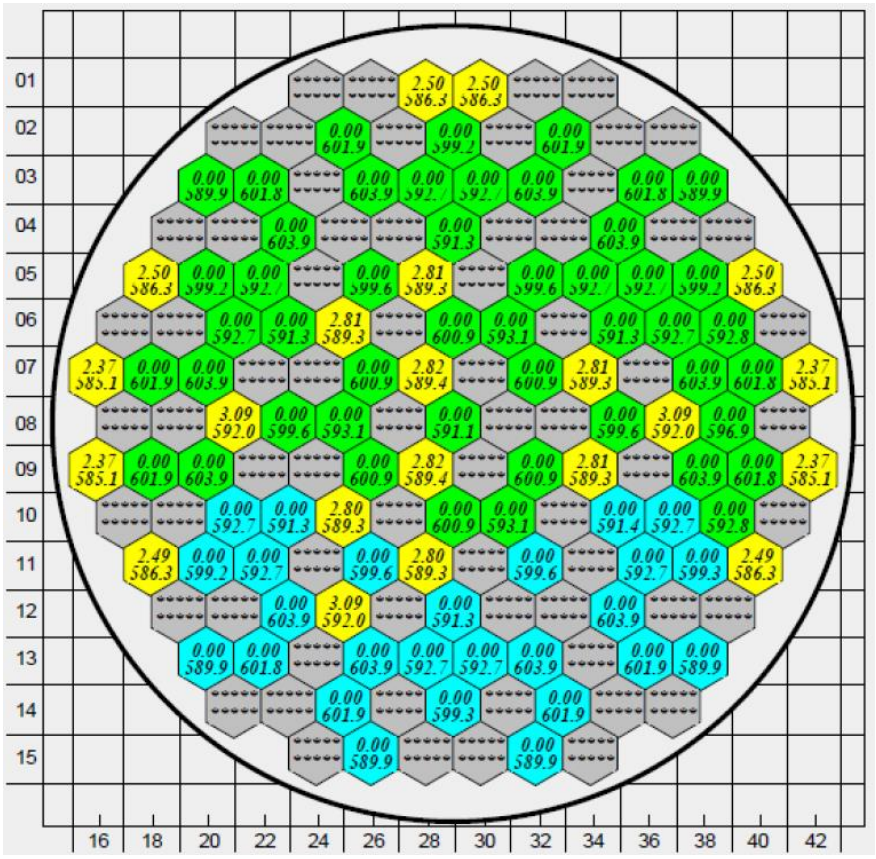
Výhody snímačů vyrobených z kabelu s minerální izolací oproti klasickým drátovým termočlánkům:

- rychlejší časová odezva na změnu měřené teploty
- konstrukční ohebnost
- velmi malé rozměry
- větší stabilita výstupních signálů
- vysoká odolnost proti přetlaku

Prostředí vhodné pro jejich použití:

- vnitro reaktorová měření teplot chladiva primárního okruhu
- měření teploty médií během technologických procesů (např. v sekundárním okruhu)
- měření teploty stěny tlakové nádoby reaktoru
- řízení tepelného zpracování
- v potrubích, nádržích, průmyslových prostorech, v pecích a s použitím ochranných armatur i v agresivních prostředích

Termočlánky, které jsou použity na JE Temelín, jsou trubičky o průměru 4,5mm, které jsou umístěny v kanálech. Délka těchto sond je přes sedm metrů. Průchod termočlánku skrze víko tlakové nádoby reaktoru je řešen hermetickou průchodkou, která je testována na těsnost až 5×10^{-8} [Pa m^3 / s]. Sonda je zakončena konektorem LEMO. [2]



Obr. 6: Rozložení termočlánků v aktivní zóně [2]

Pro české jaderné elektrárny toto zařízení vyrábí firma ŠKODA JS a.s., která termočlánky dodává i za hranicemi našeho státu. [7]

Co se týká životnosti těchto teplotních čidel, tak je odhadována na přibližně 5 let, podle náročnosti provozu a kvality jednotlivých čidel. Tato doba použití je podložena konzultací s odborníkem panem Ing. Václavem Bláhou, CSc.

Stavy a polohy akčních členů

Tento druh měření zajišťuje údaje o polohách různých zařízení. Jde například o stav uzavíracích armatur, které mají koncové spínače v obou svých koncových polohách. Dle sepnutého spínače se zjistí, zda je armatura otevřená nebo zavřená. Všechny tyto informace jsou automaticky vedeny do systému kontroly a řízení. Dále je zde měřena přesná poloha regulačních akčních členů: regulačních orgánů reaktoru, klapek a ventilů nebo například čerpadla.

Elektrická měření

Elektrické měření je využíváno téměř na všech komponentách. Jednak se mohou měřit přímo elektrické veličiny, ale daleko častěji jsou měřeny signály, které se na elektrické

impulsy převádějí. Měříme napětí, proudy, výkony nebo frekvence. Dále pomocí tzv. „suchých kontaktů“ se měří koncové polohy různých regulačních orgánů a čerpadel.

Chemické složení prostředí

Toto měření se velmi liší podle druhu prostředí, ve kterém je prováděno. Pokud se jedná například o složení vzduchu v kontejnmentu, měříme zde vlhkost, koncentrace různých plynů a také případnou přítomnost radioaktivních prvků. Pokud ale měříme chemické složení například chladiva primárního okruhu, zajímají nás hodnoty koncentrací kyseliny borité, chloridů a fluoridů, koncentrace vodíku, draslíku, lithia či sodíku. Dále se také měří pH chladiva, a to z důvodu zamezení vzniku koroze. Chemická měření také samozřejmě probíhají na „vodoočistkách“, na doplňovací vodě a v sekundárním okruhu.

b) Neutronová měření

Tato měření lze dále dělit podle toho, kde probíhají.

INCORE

InCore v překladu „v zóně“ znamená, že měření probíhá přímo uvnitř tlakové nádoby reaktoru v aktivní zóně.

EXCORE

Oproti tomu ExCore znamená, že měření probíhá vně tlakové nádoby reaktoru, tedy i mimo aktivní zónu.

Toto měření se nechá označit za jedno z nejdůležitějších měření na jaderné elektrárně. Z neutronového toku lze vyhodnocovat výkon reaktoru, perioda reaktoru, rozložení výkonu po průměru a po výšce reaktoru, dále lze dopočítat vyhořívání palivových článků a další provozní parametry. [1]

Jedná se o měření počtu neutronů neboli tok neutronů. Tento tok neutronů měříme jak uvnitř tlakové nádoby reaktoru (InCore), tak i mimo nádobu (ExCore).

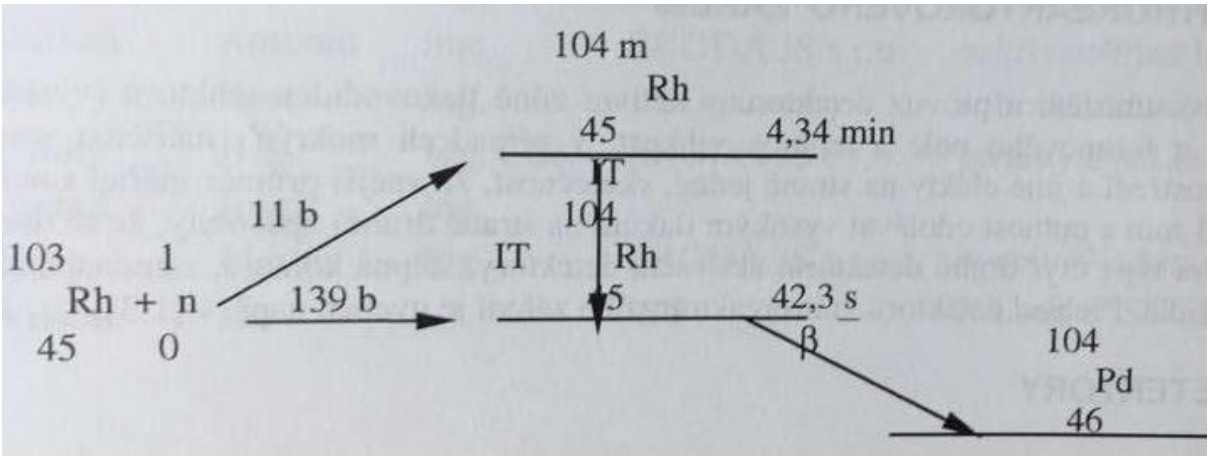
Sondy pro ExCore měření jsou rozmístěny po obvodu reaktorové nádoby v tzv. ionizačních komorách. A hodnoty naměřené těmito sondami jsou online zavedeny do SKŘ[3], kde vstupují do systémů ochran reaktoru.

Sondy pro měření InCore vedou skrze celou aktivní zónu, nahoru skrze tlakovou nádobu reaktoru, až přes blok ochranných trub. Skrz víko tlakové nádoby reaktoru jsou tyto sondy vedeny v hermetických průchodkách, stejných jako mají termočlánky. Pomocí těchto sond

[3] SKŘ = systém kontroly a řízení

se získávají informace o radiálním i axiálním rozložení neutronového toku v aktivní zóně. Informaci získáváme ve formě elektrických signálů, které vstupují do následných zesilovačů, převodníků a výpočtů pro určení rozložení neutronového toku a také teplotního pole uvnitř aktivní zóny. Na základě těchto výpočtů se pak dále určuje vyhořívání paliva v jednotlivých místech aktivní zóny. Vyhořívání jednotlivých kazet se pak využívá při optimalizaci uspořádání následující kampaně. Také nám neutronový tok dává odezvu na pohyby regulačních orgánů, nebo změnu koncentrace kyseliny borité v chladivu primárního okruhu. [2,7]

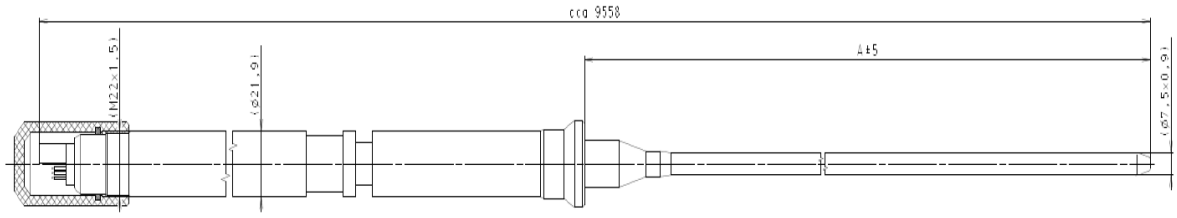
Sondy pro měření neutronového toku se nazývají čidla KNI[4]. Pro české jaderné elektrárny tato čidla vyrábí česká firma Škoda JS a.s., která má s nimi bohaté zkušenosti nejen v naší republice. Jak již bylo řečeno, tyto čidla slouží pro stanovení rozložení výkonu v aktivní zóně reaktorů typu VVER. Jsou zde používány samo napájecí detektory s rhodiovým emitorem. Samo napájecí detektory fungují i bez přívodu elektrického napájení a to na principu neutronové aktivace. [7]



Obr. 7: Reakce rhodia s neutronem [6]

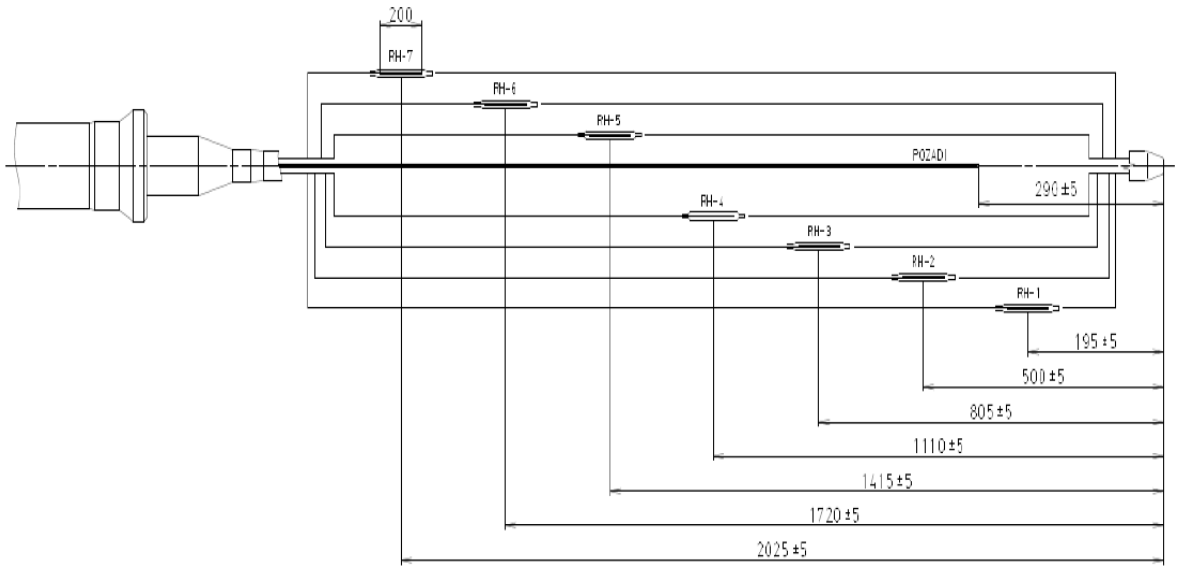
Tepelné neutrony dopadající na rhodiový emitor, způsobují rozpad rhodia a současnou emitaci beta záření. Část energetických beta částic opustí emitor a zachytí se v kolektoru. Když je obvod mezi vodiči od emitoru a kolektoru uzavřený, vzniká proudový signál úměrný počtu zachycených neutronů v emitoru. Pro eliminaci parazitních signálů vznikajících v přívodních vodičích je používán tzv. fónový vodič. Fónový vodič může být zabudován i uvnitř rhodiového detektoru. Signály samo napájecích detektorů se přepočítávají na hodnoty lineárního výkonového zatížení palivové kazety. Tyto čidla jsou konstruovány jako jedno- nebo dvoužilové kabely s minerální izolací. Rhodiový drát je zde použit o velmi vysoké čistotě. Celá KNI jsou zakončena elektrickými konektory. [7]

[4] KNI = kanály měření neutronového toku



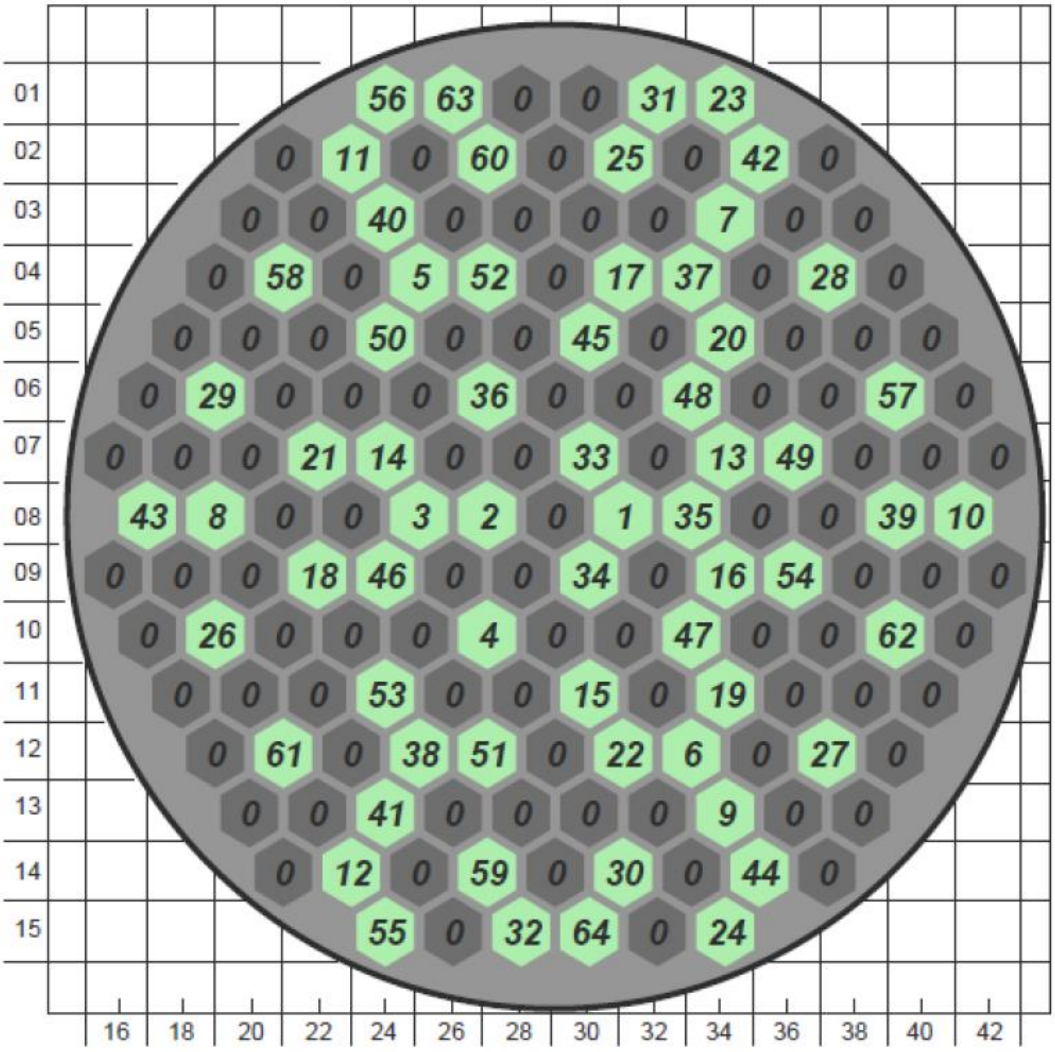
Obr. 8. a): Konstrukce čidla neutronového toku [2]

Z toho obrázku je vidět kompletní konstrukce čidla neutronového toku. Úzká část napravo, je zasunuta do aktivní zóny, přibližně uprostřed obrázku, což je v horní části čidla, se nachází hermetická průchodka, která vede skrze víko tlakové nádoby reaktoru. Dále zde vidíme vrchní část, která vede skrze blok ochranných trub.



Obr. 8. b): Detail konstrukce s naznačením rozmístění rhodiových detektorů [2]

V tomto detailu jsou naznačeny polohy, do kterých jsou rhodiové detektory rozmístěny. Rhodium, použité v detektorech s postupem času a hlavně intenzity toku neutronů, vyhořívá. Proto je potřeba tyto KNI, neboli čidla neutronového toku, pravidelně vyměňovat.



Obr. 9: Rozložení čidel neutronového toku v aktivní zóně VVER 1000 [2]

Kanály čidel KNI jsou zasunuty do aktivní zóny na 36 souřadnicích u reaktoru VVER 440 a na 64 souřadnicích u reaktoru VVER 1000. Každý z těchto kanálů obsahuje sedm rhodiových detektorů, které jsou rovnoměrně rozmístěny po výšce čidla KNI. Délka čidel je tedy různá, ty nejdelší čidla dosahují až dvanácti metrů. [7]

Jak již bylo řečeno, čidla je nutné během údržby reaktoru pravidelně vyměňovat za nové. A to z několika důvodů: vyhořívání rhodia a tím snížení síly signálu, degradace izolace zapříčiní vznik šumů v signálu, anebo mechanické opotřebení čidel. K tomuto účelu je na jaderných elektrárnách speciální zařízení na jejich likvidaci. Zařízení na likvidaci čidel neutronového toku a termočlánků, lidově řečeno „kničkoužrout“.

IX. ZAŘÍZENÍ NA LIKVIDACI ČIDEL NEUTRONOVÉHO TOKU A TERMOČLÁNKŮ

Zařízení pro vyjmutí, transport a likvidaci KNI a termočlánků z reaktorů typu VVER slouží k vytažení čidel z bloku ochranných trub. Dále pak k jejich transportu a samotné likvidaci. Dále se čidla ukládají do tzv. „vymíracího úložiště“ na reaktorovém sále. Účelem zařízení je rychlá a bezpečná likvidace radioaktivních materiálů a ochrana obsluhy reaktoru před radioaktivním zářením. Uvedené zařízení bylo dodáno českou firmou Škoda JS a.s. na JE Mochovce v roce 2012 a v jiném konstrukčním provedení i na JE Temelín v roce 2014. [7]

Tento, technicky slangový název pro likvidátor čidel neutronového toku, “kničkožrout”, má velmi tlustou ocelovou stěnu, která slouží k odstínění silného radioaktivního záření z právě vyjmutých čidel neutronového toku a termočlánků. Pod tímto masivním pláštěm se skrývají dva hlavní stroje. V horní části je uložen stroj, který má za úkol stříhat jednotlivá čidla tak, aby se jejich fragmenty vešly do výše zmíněného vymírajícího uložiště. Střih těchto radioaktivních materiálů probíhá velice čistě, s minimem jakýchkoli třísek. K tomuto střihacímu zařízení jsou čidla dopravována pomocí vedení, jež zajistí přesnou polohu čidla před každým střihem.

Druhé důležité zařízení v „kničkožroutovi“ je podávací zařízení. Mechanismus tohoto podávacího zařízení je právě předmětem této diplomové práce. Hlavním úkolem tedy je, jak zajistit posuv čidel ke střihacímu zařízení. Na následujících obrázcích jsou pohledy na již dodané zařízení na likvidaci čidel neutronového toku a termočlánků pro elektrárnu Mochovce a Temelín.

Obr. 10: Zařízení na likvidaci čidel KNI a termočlánků pro reaktor VVER 1000 (ETE) [7]

Tato diplomová práce se zabývá mechanismem pro stejný typ zařízení, který byl dodán na jadernou elektrárnu Temelín. Podávací zařízení se nachází ve spodní části tohoto celku a jeho současné vnější provedení je vidět na obrázku výše. Podle tohoto jediného obrázku lze soudit, že elektromotor je upevněný z vnějšku zařízení a pomocí nějakého mechanismu se jeho rotační pohyb přenáší do vnitřní části zařízení, kde je přetvářen na posuv již nevyhovujících čidel neutronového toku či termočlánků. Zásadní při navrhování takového

mechanismu budou nutné třecí síly, mezi posouvanými čidly a podávacím zařízením. Tyto síly musí být dostatečně velké, aby čidla nemohla prokluzovat zpět směrem do reaktoru, ale zároveň tato síla nesmí mít destruktivní účinky na podávaná čidla.

Jedním z hlavních faktorů tedy budou mechanické vlastnosti podávaných čidel KNI. Čidlo se nesmí za žádnou cenu přetrhnout, jelikož zatím není vymyšlen způsob, jak takto přetržené čidlo z reaktoru vyjmout.

Obr. 11: Zařízení na likvidaci čidel KNI a termočlánků pro reaktor VVER 440 (EMO) [7]

X. VSTUPNÍ INFORMACE

Na počátku řešení byl znám pouze prostor, do kterého je nutné daný podavač vměstnat. Dále je znám druh materiálu, z kterého jsou ochranné trubičky čidel KNI a termočlánků vyrobeny – **08Ch18N10T**, nerezavějící, nemagnetická, austenitická ocel. Dle normy ČSN tato ocel nese označení ČSN ISO EN 17 247, dle německé normy se jedná o ocel s označením DIN X6CrNiTi1810. Chemické složení této oceli je vidět v následující tabulce:

ČSN	Chemické složení v %									Teplota tání (°C)
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Mo	Ti	V	
17 247	max. 0,08	max. 2	max. 1	17-19	9,5-12			min. 5		550 - 600

Tab. 2: Chemické složení konstrukčního materiálu trubiček „KNIček" a termočlánků. [11]

Materiálové vlastnosti této oceli jsou vidět v tabulce 3. Z této oceli budou vyrobeny všechny součásti, které se mohou dostat do styku s médiem primárního okruhu.

Materiálové vlastnosti				Teplota [°C]							
Značka oceli	Sortiment	x	Max. teplota [°C]	20	50	100	150	200	250	300	350
08Ch18N10T	tvarová válcovaná ocel, výkovky z tvar. Oceli prům. do 200mm	R_m	600	491	480	461	436	417	397	377	353
		$Rp_{0,2}$		196	191	189	186	181	176	172	167
		A5		38	37	36	33	31	28	26	25
		Z		40	40	40	40	40	40	40	40
	Desky, výk. z ingotu, polot. z plechu a výlisky prům. nad 40 do 200 mm	R_m		490	477	456	426	417	382	358	333
		$Rp_{0,2}$		196	193	186	181	176	167	162	157
		A5		35	34	33	31	29	27	26	25
		Z		40	40	40	40	40	40	40	40
	Desky, výk. z ingotu, polot. z plechu a výl. prům. nad 200 mm	R_m		491	477	456	426	417	382	358	333
		$Rp_{0,2}$		196	193	186	181	176	167	162	157
		A5		35	34	33	31	29	27	26	25
		Z		40	40	40	40	40	40	40	40

Tab. 3: Materiálové vlastnosti konstrukčního materiálu 08Ch18N10T [12]

Ostatní materiálové parametry, potřebné hlavně ke správnému navrhování konstrukce, jsou uvedeny v kapitole Výpočty nutné pro správné nadimenzování konstrukce.

Čidla KNI se skládají z nerezové trubičky o vnějším průměru 7,5 mm a vnitřním průměru 5,5 mm. Uvnitř této trubičkou jsou vedeny vodiče k jednotlivým rhodiovým detektorům. Zbylý prostor je vyplněn izolací. Celková délka tohoto čidla je 11 000 mm. Trubička termočlánku má vnější průměr 4 mm a tloušťku stěny 1 mm. Na následujících obrázcích je možno vidět část trubičky čidla KNI, i část KNI s vodiči uvnitř. Další obrázek je termočlánek.

Obr. 12, 13: Trubička čidla KNI

Obr. 14: Odštěpek KNI čidla i s vodiči uvnitř

Obr. 15: Termočlánky [7]

Na počátku je také důležité si uvědomit, že celé podávací zařízení bude provozováno ve vysoce radioaktivním prostředí, kde může velice snadno dojít ke kontaktu s vodou primárního okruhu. Z toho vyplývá, že veškeré součásti zařízení, které se mohou dostat do styku s touto kapalinou, budou muset být vyrobeny z nerezavějící oceli. Ocel byla vybrána totožná, z jaké jsou vyrobeny samotné trubičky obou čidel. A to hlavně z důvodu zamezení jakýkoli chemickým reakcím, které by mohly v budoucnu poškodit správný chod zařízení.

A v neposlední řadě je také důležité zmínit fakt, s kterým mě seznámil pan Ing. Václav Bláha CSc, a to, že za dobu provozování JE Temelín zatím nebylo ani jednou potřebné vyměnit termočlánek. Nevyměňují se z důvodu bezporuchového provozu. A také platí, že termočlánky nejsou nutně potřebnou součástí řídicího systému jaderné elektrárny Temelín. Teplota v tlakové nádobě reaktoru je totiž do systému kontroly a řízení brána z odporových teploměrů. Oproti tomu vnitro reaktorová čidla KNI mají předem projektovou životnost 5-7 let. Proto jsou tato čidla pravidelně kontrolována a případně i vyměňována při odstávkách. Mimochodem, ani výstupy z čidel KNI nejsou zavedeny do SKŘ. A to z důvodu jejich dlouhé odezvy (kolem 42 [s]). Systém SKŘ bere data o neutronovém toku z měření vně reaktoru – v ionizačních komorách.

Hlavní funkce podávacího zařízení je tedy zajistit posuvný pohyb vzhůru již použitých čidel.

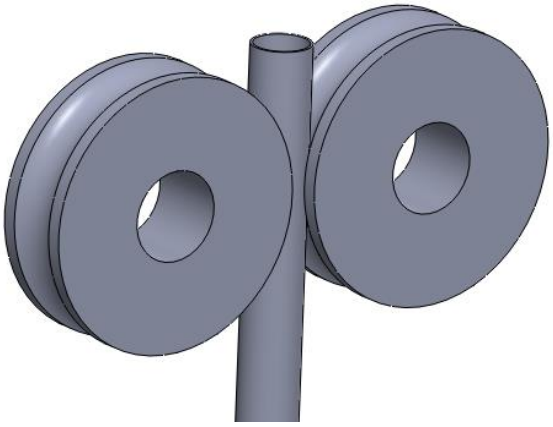
XI. VÝBĚR MECHANISMU PODÁVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Na počátku celé této práce byla provedena rozsáhlá rešerše již stávajících řešení v podobné problematice. Tím souslovím „podobná problematika“ je míněno podávání libovolného předmětu tvaru trubky.

Stávající řešení podavače přímo v likvidátoru čidel neutronového toku nebylo předem známo, a tak bylo nutné prostudovat odbornou literaturu zabývající se konstrukčními návrhy různých druhů mechanismů a průmyslových podavačů.

Z těchto zdrojů vyplynuly dvě možnosti. Zaprvé možnost převodu rotačního pohybu (například kladky) na posuvný pohyb trubičky. Anebo společný lineární posuv jak trubičky, tak i mechanismu trubičku držící. První z možností je inspirována průmyslovými podavači, kteří se používají například v dřevařském průmyslu. Druhá je naopak vyvíjena ve smyslu průmyslového robota. Následně bylo připraveno několik zkušebních variant, jak by mohl mechanismus podavače vypadat. Jednotlivé varianty jsou naznačeny na následujících obrázcích.

1) Klasické 2 kladky

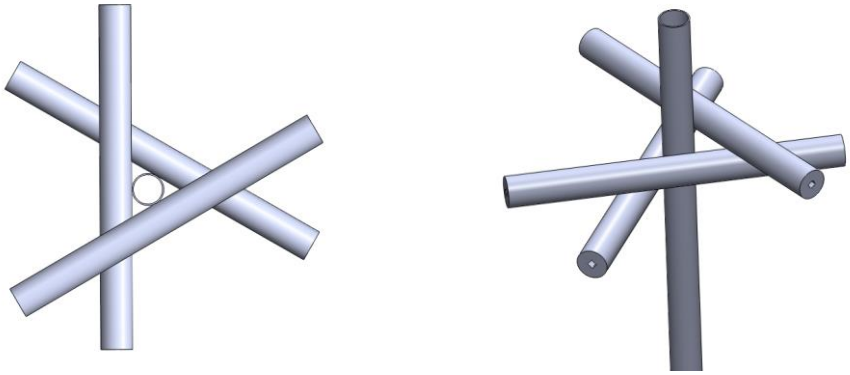


Obr. 16: Kladky

Jedna z kladek je připojena na elektromotor, aby byla schopna vykonávat rotační pohyb. Druhá kladka je přes pružinu, nebo nějaký jiný mechanismus přitlačována k první kladce, aby vytvořily dostatečnou třecí sílu mezi kladkami a dopravovanou trubičkou.

Tento druh mechanismu se od počátku jeví jako nejjednodušší a nejspolehlivější varianta. Tutu variantu lze také dále upravovat a optimalizovat. Například použitím různých tvarů kladek, čímž se docílí různě velké stykové plochy mezi kladkami a čidlem. Nebo je možné měnit počet kladek.

2) Složení 3 rotačních dílů

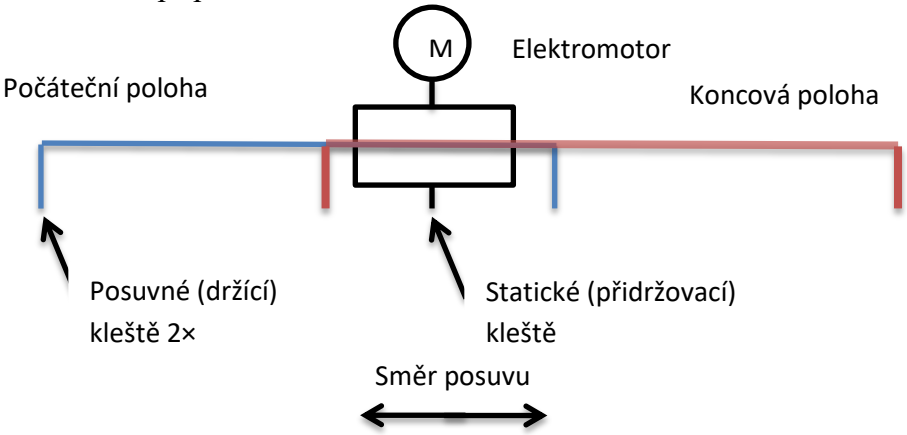


Obr. 17, 18: Rotační tyčky

Pohon tohoto mechanismu by byl realizován opět za použití elektromotoru. Jedna z tyčí by byla poháněna elektromotorem a zbývající tyče by se staraly o přítlak a vznik dostatečné třecí síly. Mechanismus by bylo nutné zhotovit dvakrát nad sebou, aby nemohlo dojít k vyhnutí dopravovaného čidla z osy pohybu. Výhoda je v rovnoměrnějším rozložení napětí v čidle KNI, protože je zde tříbodový dotyk. Naopak složitost tohoto mechanismu by se skrývala v konstrukci pro přesné uložení všech třech tyčí.

3) Vertikálně posuvný mechanismus

Tento typ mechanismu je z vybraných mechanismů ta nejkomplikovanější varianta. Jednalo by se o složité zařízení, které by disponovalo nejméně třemi svěrnými kleštěmi. Na následujícím obrázku je přibližný nákres činnosti. Je zde naznačena počáteční poloha (modrá barva), kdy posuvné (držící) kleště uchopí čidlo KNI a pomocí elektromotoru jej posunou do koncové polohy (červená barva). V této poloze bude čidlo sevřeno statickými (přidržovacími) kleštěmi a držící kleště čidlo uvolní. Dále by se posuvný mechanismus s držícími kleštěmi vrátil zpět do počáteční polohy a celý proces by se opakoval. Výhodou tohoto povedení je celkem malá náročnost na prostor. Nevýhoda je ve složitosti celé konstrukce, případném servisu a také zde není možnost kontinuálního lineárního posuvu.



Obr. 19: Posuvný mechanismus

Z důvodu důsledného zhodnocení výše nastíněných variant, byla zhotovena SWOT analýza, díky které se bude rozhodovat, který z mechanismů je nejvíce vhodný pro podávací mechanismus.

	Dvě kladky	Otočné tyčky	Vertikální posuv
KLADY	jednoduchost; malý nárok na prostor; jednoduchá údržba;	středně složitá konstrukce; jednoduchá údržba;	přesné a pevné sevření;
ZÁPORY	potřeba zajištění;	potřeba zajištění; vyšší opotřebení ložisek (úhel); nutnost dvojitého provedení; celkem rozměrné řešení	nárok na prostor; možnost vzniku odštěpků; nelze plynulý pohyb; nejsložitější zařízení; nejdražší;
PŘÍLEŽI-TOSTI	snadný a rychlý servis; dobře regulovatelný pohyb;	snadný a rychlý servis; dobře regulovatelný pohyb;	Uchopení více různých průměrů;
HROZBY	-	Dostatečná třecí síla -> možný průhyb tyček, vhodná ložiska (úhel);	spolehlivost; opotřebení; čas servisu; vznik odštěpků

Tab. 4: SWOT analýza

Na základě této předběžné analýzy a následné diskuse s panem konzultantem Ing. Antonínem Rudolfem, byly návrhy otočné tyčky a vertikálního posuvu vyřazeny a dále se s nimi již neuvažovalo. Těmi hlavními důvody byly nároky na prostorové uspořádání v zařízení a také celková složitost těchto konstrukcí.

XII. KLADKOVÝ MECHANISMU

Po vyřazení nevhodných variant je tedy jasné, že konstrukční řešení bude kladkový mechanismus. Tento druh mechanismu je velice variabilní a umožňuje mnoho modifikací. Mechanismus se může skládat z různého počtu kladek, lze upravovat počet těchto kladek, a jejich celkové uspořádání v prostoru.

Pro správný výběr výsledné konstrukce bylo nutné orientačními výpočty ověřit, zda to či ono konstrukční řešení splňuje podmínky zadání. Těmi podmínkami je hlavně myšlena dostatečná třecí síla, pro vytahování čidla KNI bez prokluzů, v kombinaci s maximální dovolenou deformací nerezové trubičky KNIčka. Důraz na povolenou maximální deformaci je kladen z důvodů dalšího transportu a následného zpracování čidel KNI.

Pomocné výpočty

Výše popsaný kladkový mechanismus tedy zajišťuje přenos síly pomocí tření mezi dvěma materiály – čidlem KNI a kladkami. Obě tyto součásti jsou vyrobeny z nerezavějící oceli s označením 08Ch18N10T. Koeficient tření mezi těmito dvěma materiály je přibližně odhadovaný, pro suchý styk materiálů, na 0,2-0,6. Pokud budou materiály výrazně mokré, nebo dokonce mastné, musíme počítat s hodnotou koeficientu tření asi kolem 0,1.

Hodnota tohoto koeficientu tření je pro naše zařízení stěžejní. Proto byl tento koeficient vyhledáván v dostupných tištěných a online dokumentech. Přesné hodnoty koeficientu tření pro styk dvou ocelí s označením 08Ch18N10T se ale nalézt nepodařilo. Tribologický výzkum styku těchto ocelí nebyl nikdy proveden a z finančních, ale i časových důvodů se tak bohužel nestane ani v této publikaci.

Koeficient tření je tedy převzat z experimentálního výzkumu pana Jana Zdebora, z kterého vyplývá, že námi hledaná hodnota bude nejpravděpodobněji někde mezi 0,2-0,4.

Pro následující výpočty byla použita nejhorší možná varianta, tedy $f = 0{,}2$.

Byl proveden výpočet, pro určení potřebné přítlačné síly, aby se čidlo KNI posouvalo vzhůru a aby bylo zamezeno možnému prokluzu tohoto čidla zpět do reaktoru.

$$V = \left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}\right) \times H$$

Kde:

V … Objem oceli v jedné trubičce čidla KNI

D … Vnější průměr trubičky

d … Vnitřní průměr trubičky

H … Výška trubičky

$$V = \left(\frac{\pi 0{,}0075^2}{4} - \frac{\pi 0{,}0055^2}{4}\right) \times 11 = 0{,}000225\ [m^3]$$

$$F_g = m \times g = V \times \rho \times g$$

Kde:

F_g *... Gravitační síla od trubičky*

m *... Hmotnost trubičky*

ρ *... Hustota materiálnu trubičky* [10]

g *... gravitační zrychlení*

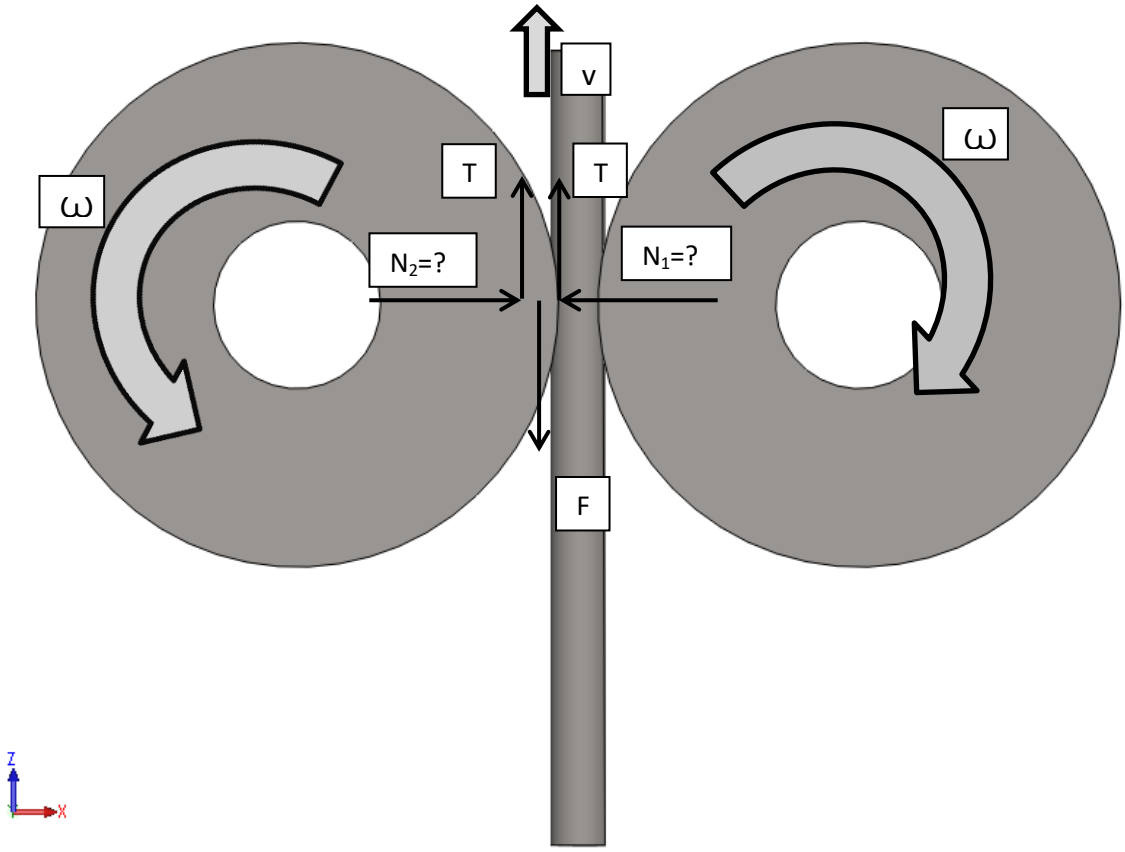
$$F_g = 0{,}000225 \times 7800 \times 9{,}81 = 17{,}22\ [N]$$

Tato síla, je tedy gravitační síla od hmoty trubičky. K ní je bezesporu nutné přičíst také gravitační síly od elektrických vodičů, samotných detektorů a od veškeré ostatní výplně uvnitř čidla KNI. Hmotnost celého čidla KNI se tedy může vyšplhat až k dvoum a půl kilogramům. Celková gravitační síla je tedy 25 N.

Dále je nutné počítat s tím, že KNI do podávacího zařízení nevstupuje pouze s gravitačními účinky, ale že zde také velkou měrou působí tření čidla, při cestě ven z reaktoru. Toto tření vyvolá, podle zkušeností pana konzultanta Ing. Rudolfa, přibližně sílu odpovídající 100 až 150% váhy čidla. Tento odhad je založen na naměřených hodnotách v jaderných elektrárenách.

Součet těchto dvou sil udává pro nás potřebnou celkovou sílu, kterou musí náš podávací mechanismus, bez jakéhokoliv prokluzu, překonat. Celková $\boldsymbol{F = 62,5\ N}$.

Na následujícím obrázku je znázorněn princip podávacího mechanismu, s vynesením všech působících sil a naznačením rychlostí rotace a posuvu.



Obr. 20: Výpočtové schéma kladkového mechanismu a působících sil

Úkolem je zjistit, jak velké potřebujeme přítlačné síly N, aby byla splněna podmínka valení a nedocházelo k prokluzu.

Podmínka valení: $T = |N \times f|$

Kde:

N ... Normálová (přítlačná) síla

T ... Třecí síla

f ... koeficient třecí

Silová rovnováha:

$$2 \times T - F = 0$$

Dosazením podmínky valení pak dostáváme rovnici:

$$f \times (N_1 + N_2) = F$$

Z obrázku vyplývá, že $N_1 = N_2$; pak tedy:

$$f \times (2 \times N) = F$$

$$N = \frac{F}{2 \times f}$$

$$\boldsymbol{N = \frac{62{,}5}{2 \times 0{,}2} = 156{,}25\ [N]}$$

Výpočtem bylo určeno, že pro dvojici kladek je minimální přítlačná síla cca 160 N. Jelikož se jedná o zařízení, které je používáno na jaderných elektrárnách při odstávkách, kde každá hodina neprovozování navíc stojí obrovské finanční ztráty. Z tohoto důvodu je zde zaveden další koeficient bezpečnosti. Jeho hodnota je 20% z celkové vypočtené přítlačné síly.

Velikost síly, která bude nadále vystupovat ve výpočtech metodou konečných prvků, je tedy **190 N** pro normální provoz.

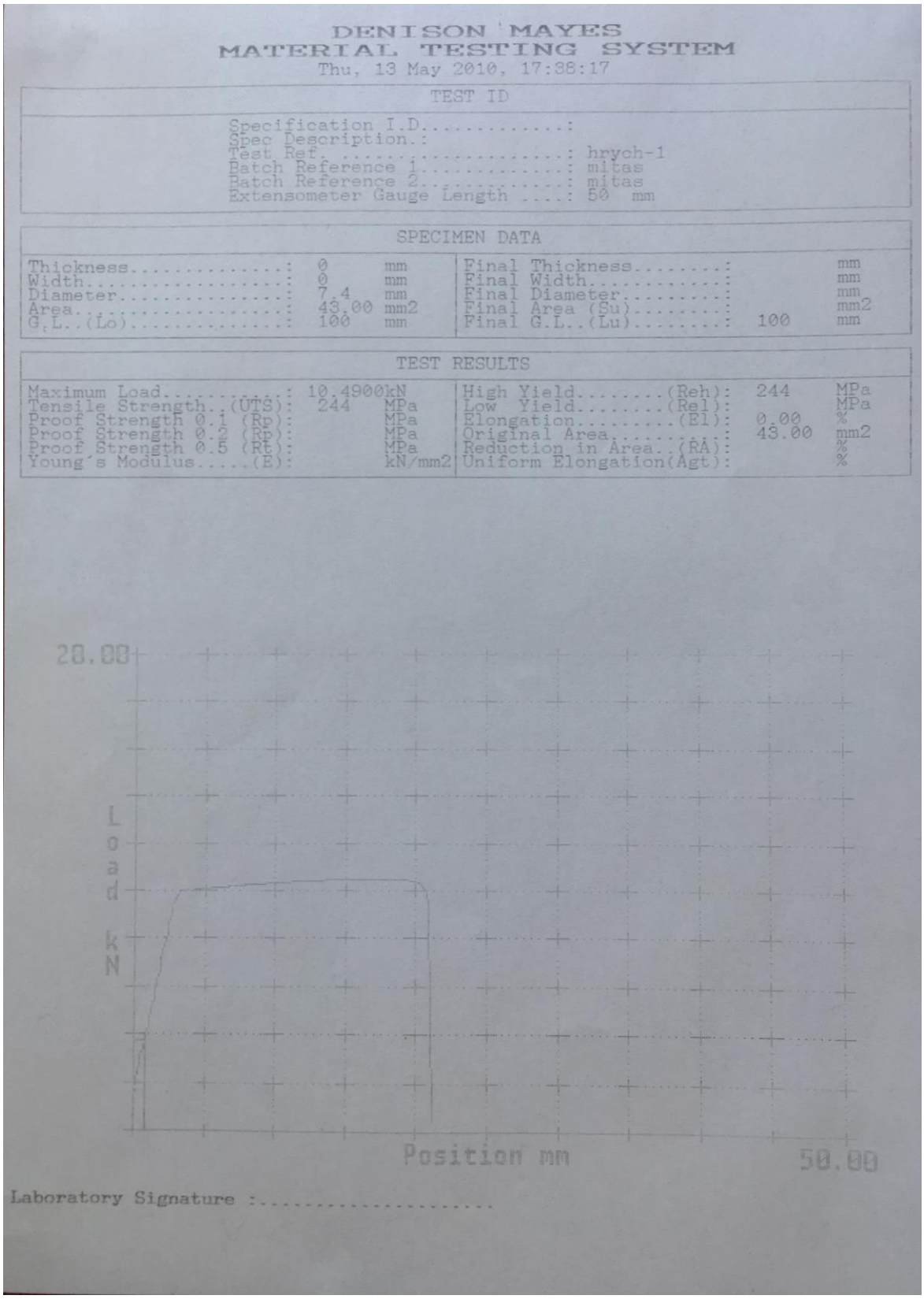
Z důvodu jakýchkoli neočekávaných událostí se ale může stát, že bude nutné použít daleko větší síly na vytažení čidel. Tyto nepředpokládatelné stavy jsou zohledněny ve výpočtech i konstrukci také. Maximální vytahovací síla, na kterou bude celé podávací zařízení nadimenzováno, je **2 000 N!** Pevnostní výpočty pak budou provedeny jak pro tuto maximální možnou sílu, tak i pro sílu při normálním provozu.

Ovšem materiálové vlastnosti materiálu 08Ch18N10T jsou pro nás určující nejen z pohledu koeficientu tření. Kladky a trubička totiž budou na sebe navzájem působit, a proto potřebujeme znát i ostatní materiálové konstanty tohoto materiálu. Z toho důvodu byla provedena zkouška tahem na dvou vzorcích trubiček čidel KNI, kde nás zajímala hlavně maximální síla, kterou čidla při vytahování vydrží, než se přetrhnou. Dále bude tento materiál použit i na hřídele, na kterých budou kladky uloženy.

XIII. EXPERIMENTÁLNÍ POKUSY NA TRUBIČCE ČIDLA KNI

Již na mnoha jaderných elektrárnách se stalo, že termočlánek, možná i čidlo neutronového toku, byl při svém vyjímání přetržen. Pokud dojde k přetržení čidla, jedná se o velmi závažný problém, který téměř vždy končí tak, že se přetržené čidlo již nepodaří vyjmout. Pak je tento kanál uzavřen a nelze již dále používat. Z tohoto důvodu byla trubička čidla podrobena tahové zkoušce.

Tahová zkouška nám jednak velice přesně ověří materiálové vlastnosti zkoumané trubičky a pak hlavně zjistí sílu, při které se trubička přetrhne. Tahová zkouška byla zadána i provedena na Západočeské Univerzitě v Plzni, panem Ing. Beneš. Na další straně je k vidění průběh této takové zkoušky. Zkouška byla provedena celkem na dvou vzorcích, kdy oba tyto vzorky daly velmi podobné výsledky. Síla potřebná k přetržení trubičky čidla KNI je přibližně 10 KN! Tak obrovskou sílu, předpokládám, pomocí námi zvoleného mechanismu ani nedosáhneme. Bohužel tělesa termočlánků nebylo možné vyzkoušet, a proto není známo, jaká síla je potřebná k jejich přetržení. Ale jelikož jejich konstrukce je ze stejné oceli, pouze o menším průměru (4mm), nechá se předpokládat mírně nižší hodnota. Odborný odhad panem Ing. Benešem byl 6 KN.



Obr. 21: Graf ze zkoušky tahem trubičky KNI

Z grafu je možné vyčíst pouze tyto hodnoty:

$F_{max1} = 10{,}33\ kN$ $F_{max2} = 10{,}49\ kN$

$\Delta l_1 = 21$ mm $\Delta l_2 = 28$ mm

Hodnota celkové délky trubičky po tahové zkoušce byla přesně odměřena:

$l_{u1} = 202$ mm $l_{u2} = 223$ mm

$l_{01} = l_{u1} - \Delta l_1 = 181$ mm $l_{02} = l_{u1} - \Delta l_1 = 195$ mm

Dále byly pomocí hodnot z diagramů a jednoduchých vzorců dopočteny následující materiálové parametry:

$$\mathfrak{6}_{max1} = \frac{F_{max1}}{S_0} = \frac{F_{max1}}{\left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}\right)} = \frac{10\ 330}{\left(\frac{\pi 0{,}0075^2}{4} - \frac{\pi 0{,}0055^2}{4}\right)} \cong 505{,}9\ [\text{MPa}]$$

$$\mathfrak{6}_{max2} = \frac{F_{max2}}{S_0} = \frac{F_{max2}}{\left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}\right)} = \frac{10\ 490}{\left(\frac{\pi 0{,}0075^2}{4} - \frac{\pi 0{,}0055^2}{4}\right)} = 513{,}7\ [\text{MPa}]$$

Kde:

$\mathfrak{6}$ *... Napětí*

D ... Vnější průměr trubičky

d ... Vnitřní průměr trubičky

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_{01}} = \frac{21}{181} = 0{,}116 \qquad \varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_{02}} = \frac{28}{223} = 0{,}125$$

Kde:

ε *... Poměrné prodloužení trubičky*

Δl *... Prodloužení trubičky*

l_0 *... Počáteční délka trubičky*

$$A_1 = \frac{(l_{u1} - l_{01})}{l_{01}} \times 100 = 11{,}6\ \%$$ $$A_2 = \frac{(l_{u2} - l_{01})}{l_{01}} \times 100 = 12{,}5\%$$

Kde:

A … Tažnost

l_u *… Konečná dálka trubičky*

$$Z_1 = \frac{(s_0 - s_{u1})}{s_0} \times 100 = \frac{1{,}0 - 0{,}61}{1{,}0} \times 100 = 39\%$$

$$Z_2 = \frac{(s_0 - s_{u2})}{s_0} \times 100 = \frac{1{,}0 - 0{,}59}{1{,}0} \times 100 = 41\%$$

Kde:

Z … Kontrakce

s_0 *… Počáteční plocha průřezu*

s_u *… Konečná plocha průřezu*

V následující tabulce jsou uvedeny ekvivalentní názvy pro materiál 08Ch18N10T v různých platných normách.

ČSN	**EN**	**DIN**	**NF**	**UNI**	**AISI**	**GOST**	**BS**
Česká Republika	Evropa	Německo	Francie	Itálie	USA	Rusko	V. Británia
17 247	X2CrNiTi 18-10	X2CrNiTi18 -10	Z6CNT1 8-10	X6CrNiT i 18 11	321	08Ch18N10T	321S31

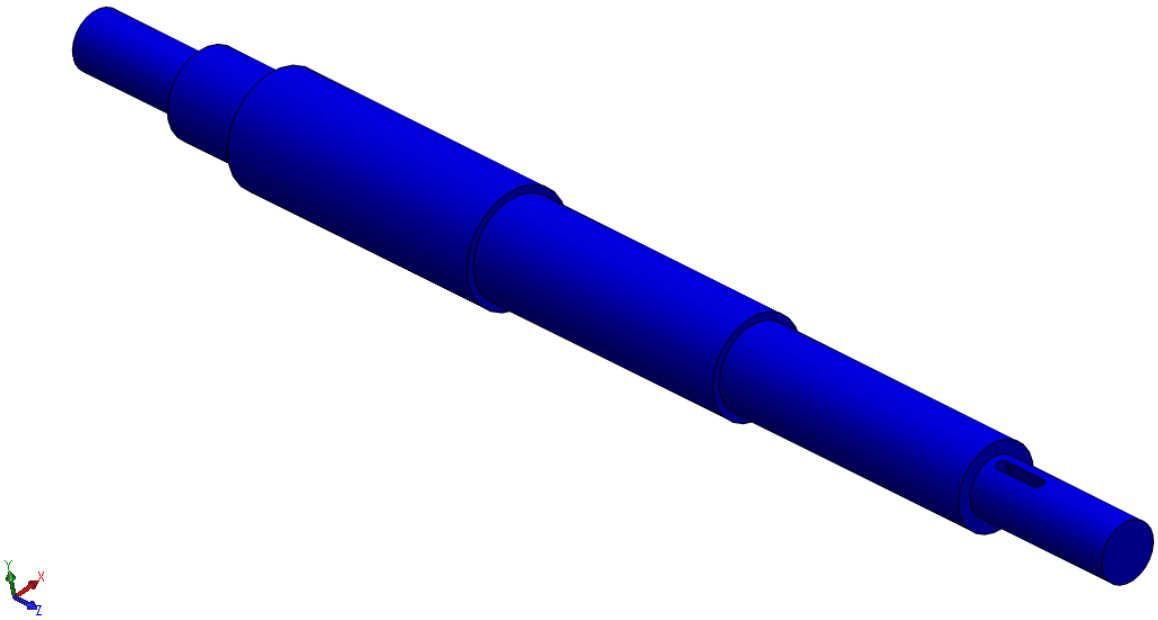
Tab. 5: Značení oceli dle různých norem [19]

GOST	**ČSN**	**Rm (Mpa)**	**RP0,1 (Mpa)**	**RP0,2 (Mpa)**
08Ch18N10T	17 247	520-720	250	220
		Svařování	**Tažnost Tváření**	**Dov. napětí v tahu (Mpa)**
		5	3	500-750

Tab. 6: Doprovodné materiálové konstanty [19,20]

XIV. KONCEPTY MOŽNÝCH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ

Celkem vznikly dvě varianty, jak vyřešit problém výsledné konstrukce. Obě varianty mají stejný základ, jak již bylo dříve nastíněno. Jedná se o dva kladkové mechanismy, kdy společnými rysy jsou systém pohonu a také systém tvorby přítlačné síly. V mechanismu je vždy polovina kladek hnaných. Tyto kladky jsou poháněny od elektromotoru, který bude kvůli jednoduchosti servisu umístěn vně „kničkožrouta“. Mechanická energie, jež je produkována elektromotorem, je přenášena na hnanou / hnané kladky pomocí odstupňovaného hřídele. Tvar této hřídele je přibližně vidět na následujícím obrázku.



Obr. 22: Odstupňovaný hřídel

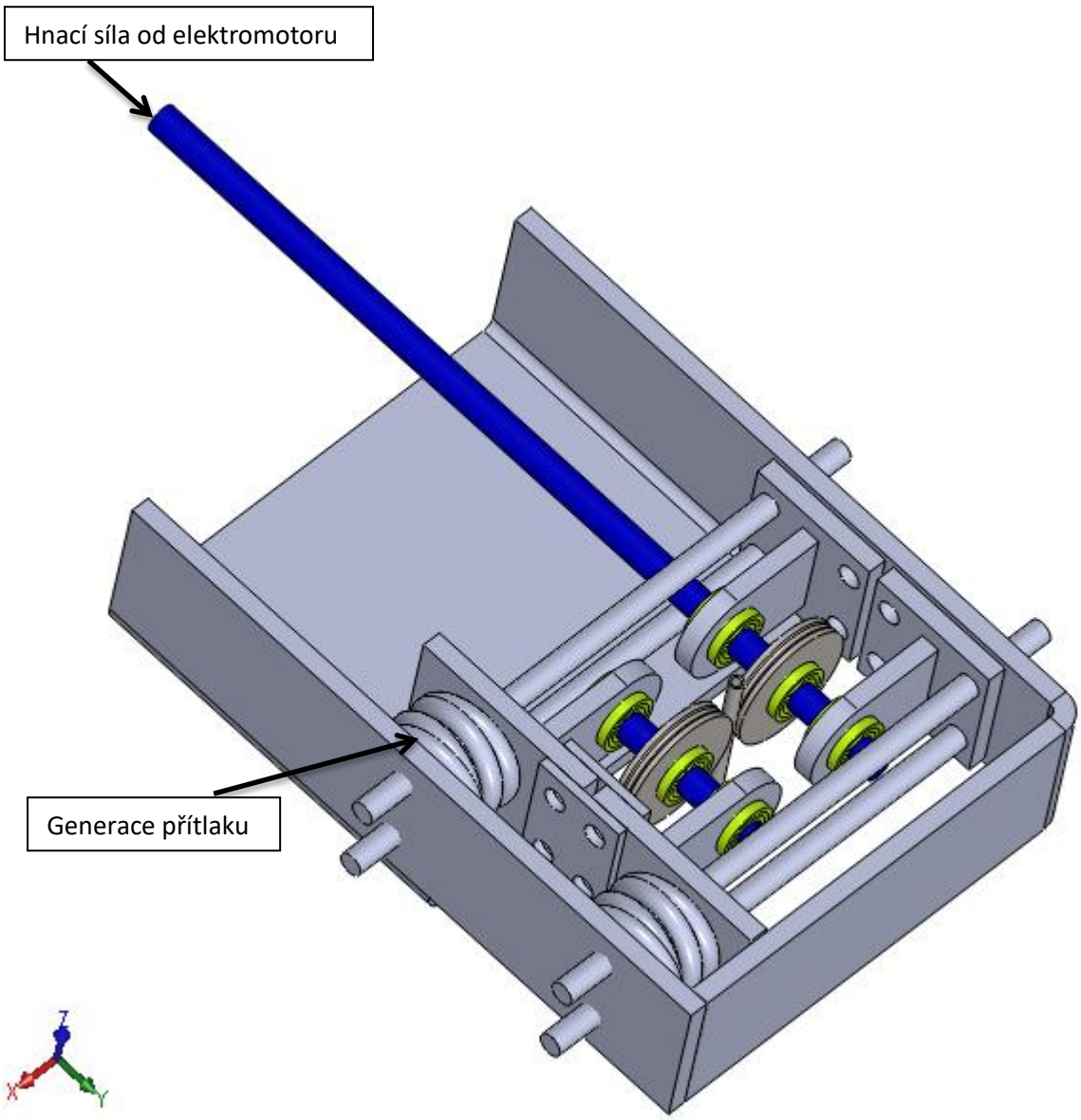
Hnací hřídel je takto tvarovaný z důvodu zamezení průchodu radioaktivního záření ven ze zařízení. Tento druh záření se šíří v přímém směru, a proto je zde snaha minimalizovat délku přímých úseků bez materiálu, kudy by se mohlo záření šířit. Celý tento hřídel je taktéž uložen v ložiscích.

1) První varianta

První varianta je složena z jedné dvojice kladek. Ložiska a tudíž i hřídele jsou uloženy v držácích, které jsou pomocí šroubů přichyceny ve svařenci tvaru U. Jejich vzájemná poloha lze velice jednoduše nastavit buď pomocí posuvu v drážkách, anebo přidáváním či ubíráním počtu podložek. Pohon kladky je skrze odstupňovaný hřídel z elektromotoru, jak bylo již napsáno. Přítlačná síla je generována pomocí pružin velkých průměrů. Velké

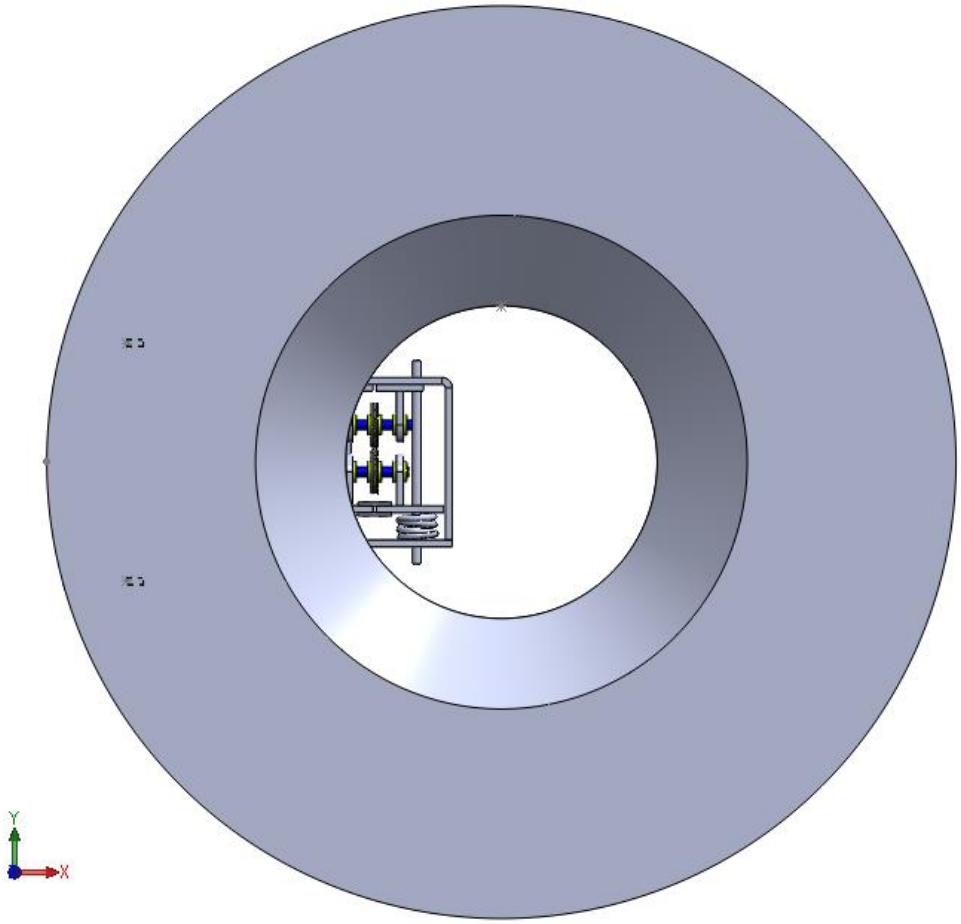
rozměry pružin zajistí, že přítlačná síla na čidla KNI (o průměru 7,5 mm) a na termočlánky (o průměru 4 mm) bude pouze málo rozdílná. Tím se zajistí dostatečná třecí síla pro vytahování obou těchto komponent. Pružiny jsou nasazeny na nerezové tyče, které zajišťují propojení všech držáků ložisek.

Ve středu celé konstrukce jsou na hřídelích uloženy obě dvě kladky. Přítlačná kladka má pouze krátkou hřídel, uloženou ve dvou ložiscích na koncích hřídele. Ovšem hnaná kladka je uložena na již několikrát zmíněné dlouhé, tvarové hřídeli. Tato hřídel by pak ve výsledné konstrukci šla až vně celého „kničkožrouta“, skrze vložku, která slouží hlavně k odstínění radioaktivního záření. Na následujícím obrázku je předběžná koncepce tohoto řešení nastíněna.



Obr. 23: První varianta podávacího zařízení

Na obrázku je znázorněna pouze koncepce, proto zde není mnoho detailů dořešeno.



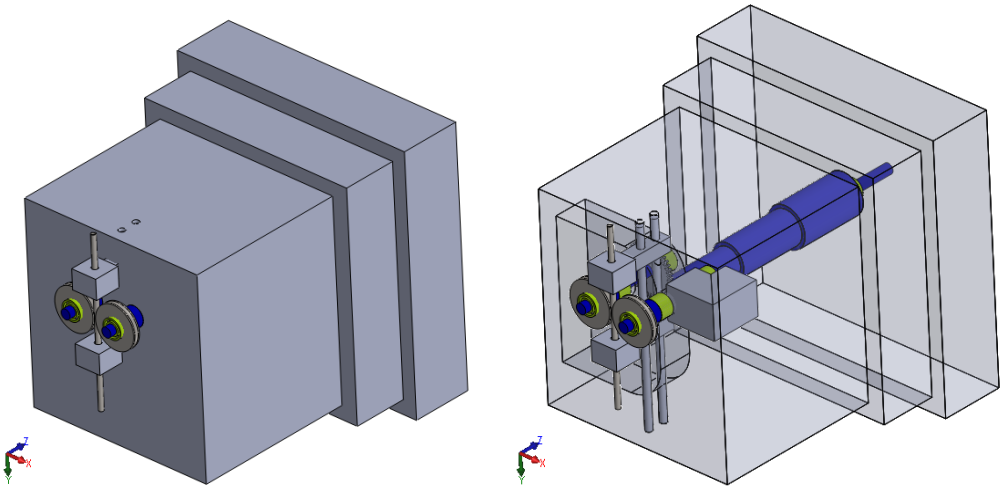
Obr. 24: První varianta podávacího zařízení v celém „Kničkožřoutivi“

Na tomto posledním obrázku je podávací zařízení zasazeno do těla celého stroje.

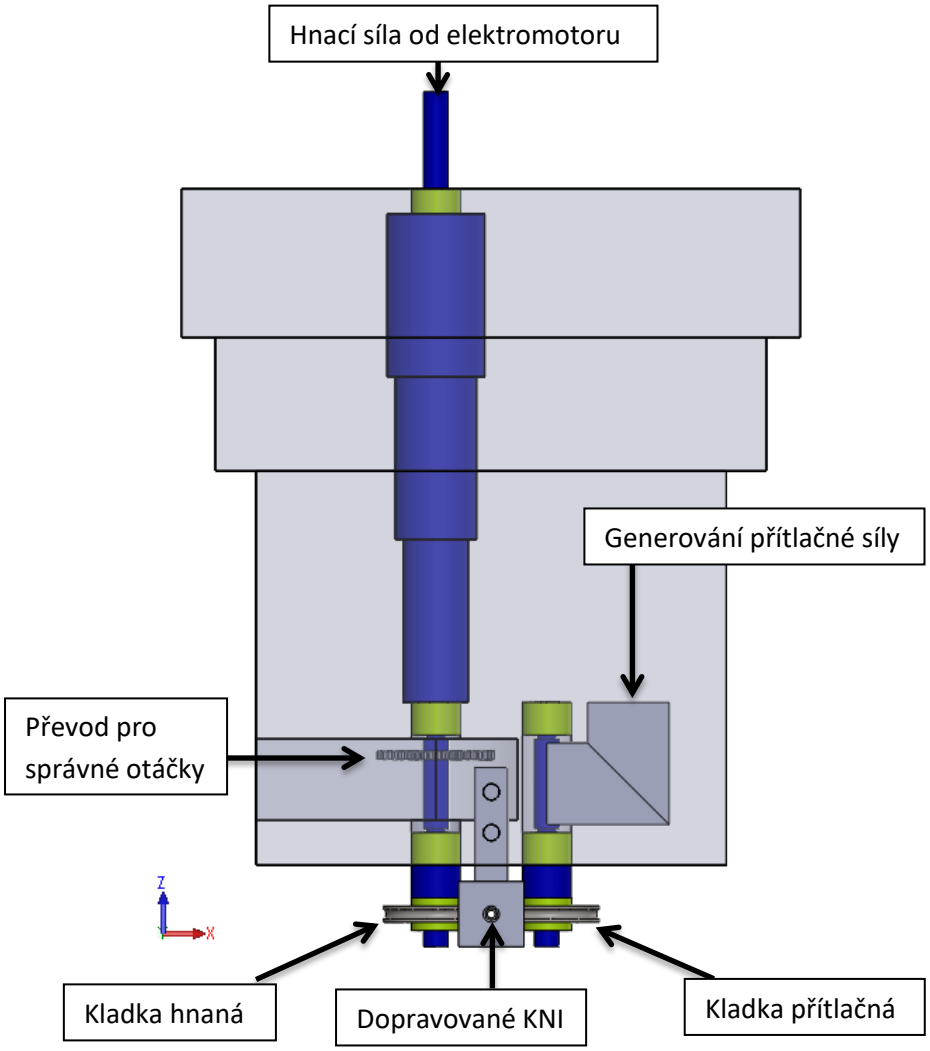
2) Druhá varianta

Druhá varianta má svou nespornou výhodu v tom, že je zde možno vložit více dvojic kladek. Konstrukce by byla schopna pojmout až tři dvojice kladek. Kolik jich bude ve výsledku potřebné použít, nám poodhalí deformační analýza pomocí výpočtů metodou konečných prvků.

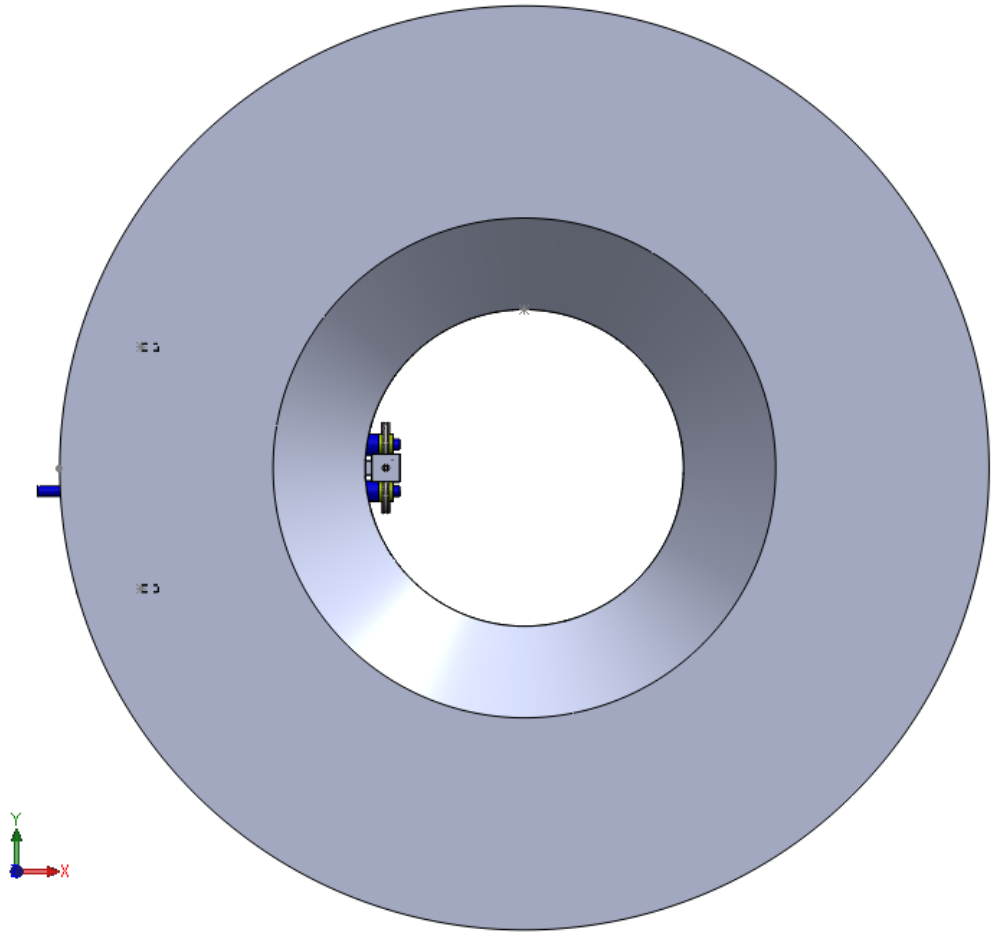
Mimo to, je druhá varianta navržena na co nejmenší náročnost prostoru uvnitř tělesa „kničkožrouta“. Kladky jsou uloženy na hřídeli jinak, než v předchozím případě. Kladky totiž nejsou mezi ložisky, ale jsou uloženy tzv. letmo, tedy na koncích hřídelů. Princip zde ovšem zůstává stejný, vždy jedna kladka je hnací a ta druhá se stará o dostatečnou přítlačnou sílu. Zde je celý mechanismus pohonu a generace přítlaku schovaný ve stínící vložce. Vše je naznačeno na následujících obrázcích.



Obr. 25, 26: Pohledy na druhou variantu podávacího zařízení



Obr. 27: Funkční schéma druhé varianty podavače



Obr 28: Druhá varianta podavače zasazena do těla „Kničkožrouta“

Na tomto posledním obrázku je podávací zařízení opět zasazeno do těla celého stroje.

Po odborné diskusi s konzultantem panem Ing. Antonínem Rudolfem bylo rozhodnuto pokračovat pouze s druhou variantou konstrukce a dále se zabývat jejím zdokonalováním. Bylo tak učiněno hlavně kvůli prostorové náročnosti a také kvůli variabilitě konstrukce. Ve výsledné konstrukci budou použity nejspíše dvě dvojice kladek z důvodu bezpečnosti a také kvůli možnosti snížit působící síly, z důvodu možných deformací.

Celková konstrukce se tedy bude skládat z mechanismu s kladkami, který bude poháněn od elektromotoru. Mezi elektromotorem a hřídelí s kladkami se bude nacházet jedna planetová, nebo šneková převodovka s vysokým převodovým poměrem a jeden ozubený převod, který zajistí transport rotace na obě dvojice kladek. Přítlačnou sílu bude vyvozovat další mechanismus, pravděpodobně přeměna axiálního posuvu šroubu v posuv přítlačné části. Podle velikosti možných vzniklých deformací pak bude konstrukce případně dále upravována.

XV. VÝPOČTY NUTNÉ PRO SPRÁVNÉ NADIMENZOVÁNÍ CELÉ KONSTRUKCE

Veškeré níže uvedené vzorce, výpočty dimenzování, návrhy a definice proběhly v souladu s postupy uvedenými v knihách Příručka strojního inženýra 1 a 2. [3, 4]

Na počátku bylo nadefinovaná přibližná rychlost, jakou by se měli čidla vysouvat – 0,05 m/s. A jelikož vnější průměr kladek je u všech variant podobný, tedy 65 mm, vychází otáčky hřídele s kladkami takto[5]:

$$\omega_2 = \frac{v}{r} = \frac{0{,}05}{0{,}0325} = 1{,}538 \text{ [rad/s]}$$

Kde:

v … rychlost posuvu

r … poloměr kladky

$$\omega = 2\pi n$$

$$n_{kladek} = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{1{,}538}{2\pi} = 0{,}245 \text{ [ot./s]} \; ; \; n_{kladek} = 14{,}7 \text{ [ot./min]}$$

Ve výsledném konstrukčním řešení je plánováno spojení hřídele od elektromotoru a hřídele, na které je uložena hnaná kladka, pomocí ozubení. Toto ozubení bude mít převodový poměr 1,6 (převod do pamala), a tedy otáčky hnací hřídele budou:

$$n_{pastorku} = n_{kladek} \times 1{,}6 = 23{,}52 \; [ot./min]$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_{pastorku}}{60} = 2{,}463 \text{ [rad/s]}$$

Výpočet krouticího momentu a výkonu:

$$M_t = F \times r = 2000 \times 0{,}0325 = 65 \text{ [Nm]}$$

Kde:

M_t … Točivý moment

P … výkon elektromotoru

n … otáčky elektromotoru

[5] U všech následujících výpočtů je indexování číslem: 1 – hnací hřídel (pastorek)
2 – hnaný hřídel (kladky)

Výkon, který je tedy potřebný přenést na hnanou hřídel s kladkou, je vypočítán zde:

$$P = M_t \times \omega_2 = 65 \times 1{,}538 = \ 99{,}97 \cong 100 \text{ [W]}$$

Z tabulky je známo, že dovolené namáhání v tahu je hodnota $\sigma_{Pt} =$ 500-750 MPa. Po započítání bezpečnosti k = 2,5 se získává hodnota $\sigma_{Dt} = \frac{\sigma_{Pt}}{k} = 200$ MPa.

Dle tohoto vzorce, $\tau_{Dk} = 0{,}6 \times \sigma_{Dt}$ [14], by pak dopočítaná hodnota dovoleného namáhání tohoto materiálu v krutu byla 120 MPa.

Tato hodnota se shoduje i s hodnotami uváděnými na internetových stránkách různých výrobců. [15]

Dimenzování hřídele:

$$\tau_{Dk} \geq \frac{M_t}{W_k} = \tau_{max}$$

Kde:

τ_{Dk} *... Dovolené napětí v krutu*

W_K *... Průřezový modul v krutu*

$$\tau_{max} = \frac{M_t}{W_k} = \frac{\frac{P}{2\pi n}}{\frac{\pi d^3}{16}} \quad => \quad d_{min} = \sqrt[3]{16\frac{\frac{P}{2\pi n}}{\pi \tau_D}} = \sqrt[3]{\frac{16 \times 65}{\pi \times 120 \times 10^6}} = 0{,}01402\ [m] \cong 14{,}1\ [mm]$$

Nejmenší průměr hřídele je tedy zvolen **15 mm**.

V případě návrhu odstupňované hnací hřídele, na kterém bude uložen pastorek, je výpočet totožný, a to z důvodu shodné hodnoty dovoleného namáhání v tahu pro materiál 08Ch18N10T a pro ocel 11 500.

V případě, že se z důvodů spolehlivosti a bezpečnosti bude celé zařízení dvakrát jistit, to znamená, že se hnací a přítlačná kladka zdvojí, tak se změní i krouticí moment působící na odstupňovanou hřídel. Pak by bylo nutné provézt nový návrh minimálního průměru hřídele.

Dále si zvolíme základní parametry ozubení:

Druh ozubení – přímé vnější ozubení (evolventní)

Zvolený převodový (tabulkový) poměr: $i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_1}{z_2} = 1{,}6$

Vypočtená úhlová rychlost pastorku: $\omega_1 = i \times \omega_2 = 2.463$

Minimální počet zubů pastoru: $z_1 = 17$

Modul m = 2,5

Úhel náběhu $\alpha = 20$ [°]

Šířka pastorku $b_1 = 25$ [mm]

Šířka kola $b_2 = 25$ [mm]

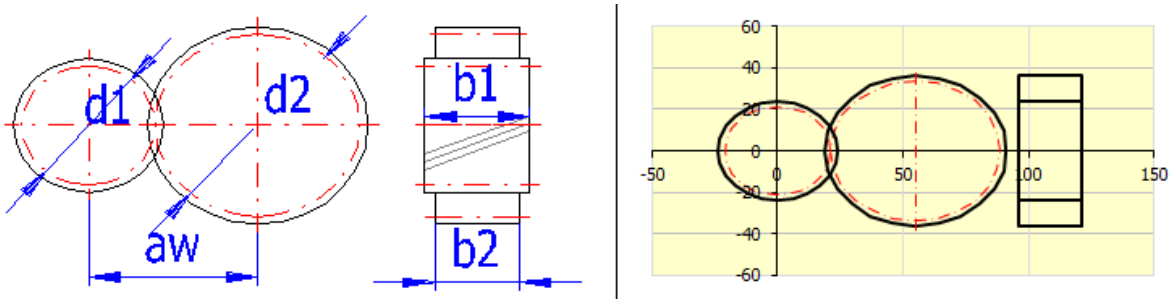
Součinitel výšky hlavy zubu $h_a^* = 1$

Jednorázová vůle $c^* = 0{,}25$

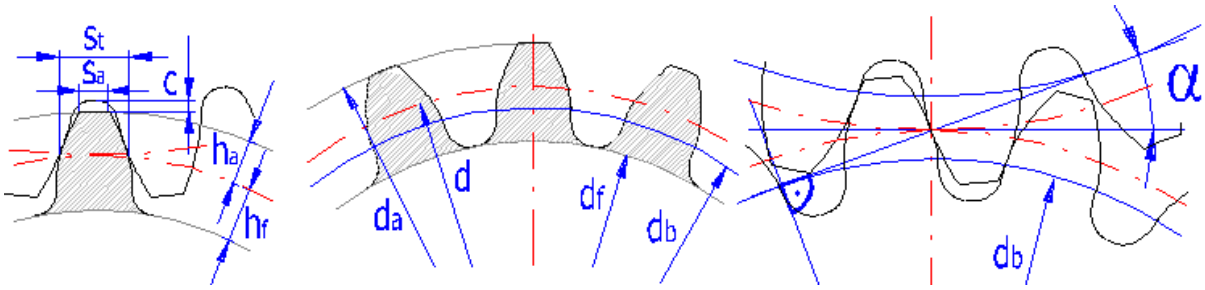
Pro výpočet ozubených kol bylo využito programu MITCalc, který po zadání výše uvedených vstupních parametrů navrhne celý ozubený převod.

Veličina	Zn. [jednotky]	Vzorec	Hodnota	
			Pastorek	Kolo
Počet zubů kola	z [-]	$z_2 = i \times z_1$	17	27
Šířka pastorku/kola	b [mm]	b = min 25	25	25
Roztečné kružnice	d [mm]	$d_{1,2} = z_{1,2} \times m;$	42,5	67,5
Rozteč	p [mm]	$p = \frac{\pi d}{z} = \pi m;$	7,854	
Základní kruž.	d_b [mm]	$d_b = d \times cos\alpha;$	39,9369	63,4293
Osová vzdálenost	a [mm]	$a = \frac{d_1 + d_2}{2};$	55	
Hlavová kruž.	d_a [mm]	$d_a = d + 2h_a;$	47,5	72,5
Patní kruž.	d_f [mm]	$d_f = d + 2h_f;$	36,25	61,25
Výška zubu	h [mm]	$h = h_a + h_f;$	5,625	5,625
Tl. zubu na rozteč. kruž.	s_t [mm]	$s_t = \frac{\pi m}{2}$	3,927	3,927

Tab. 7: Vypočtené parametry ozubení



Obr. 29, 30, 31: Znázornění ozubených kol a jejich parametrů



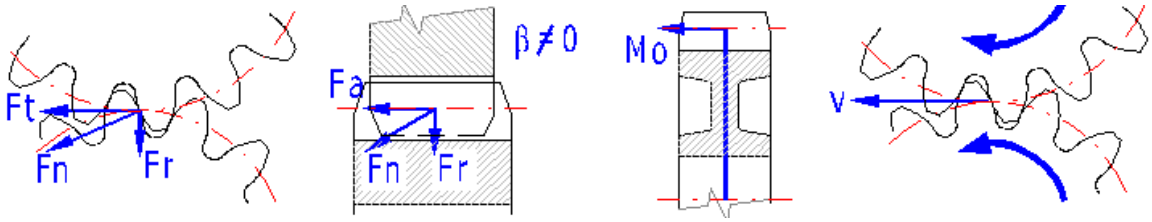
Obr. 32, 33, 34: Znázornění ozubených kol a jejich parametrů

Vzniklá obvodová síla: $F_t = 1910{,}8$ [N]

Vzniklá normálová síla: $F_n = 2033{,}4$ [N]

Vzniklá axiální síla: $F_a = 0{,}0$ [N]

Vzniklá radiální síla: $F_r = 695{,}5$ [N]



Obr. 35, 36, 37, 38: Znázornění sil působících v ozubení

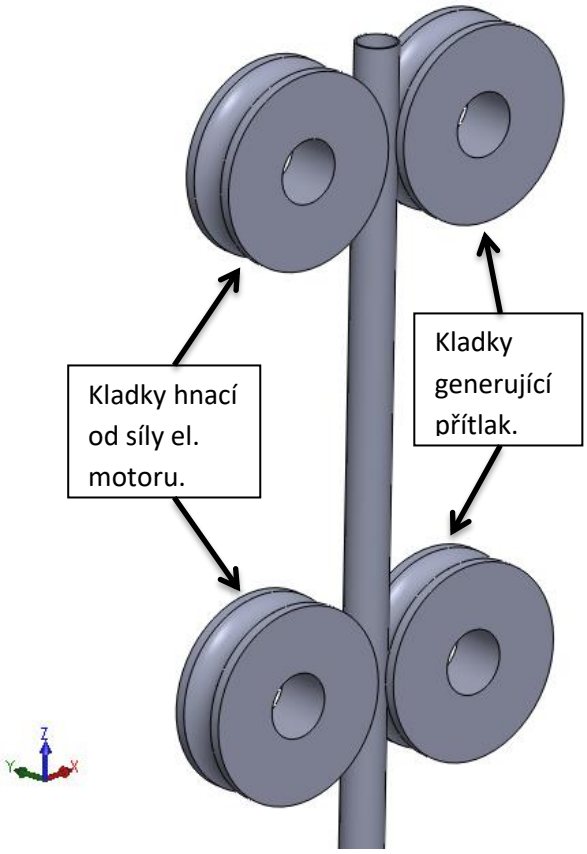
Na závěr je zapotřebí uvést, že ozubený převod je vyroben z konstrukční uhlíkové oceli, která je cementována a kalena. Přesné materiálové konstanty jsou převzaty z programu MITCalc a jsou pro obě kola stejné. Lze je vidět v následující tabulce.

Hustota	Ro	7870	[kg/m^3]
Modul pružnosti (tah, tlak)	E	206	[GPa]
Mez pevnosti v tahu	Rm	495	[MPa]
Mez kluzu v tahu	Rp0.2	295	[MPa]
Poisonova konst.		0,3	
Mez únavy v dotyku	SHlim	1210	[MPa]
Mez únavy v ohybu	SFlim	500	[MPa]
Tvrdost zubu na boku	VHV	650	[HV]
Tvrdost zubu v jádře	JHV	150	[HV]

Tab. 8: Materiálové konstanty ozubených kol

V programu MITCalc jsou uvedené i mnohé další více, či méně důležité parametry ozubení. Výstup z tohoto programu bude k diplomové práci přiložen.

Výpočet výkonů, per a ložisek:



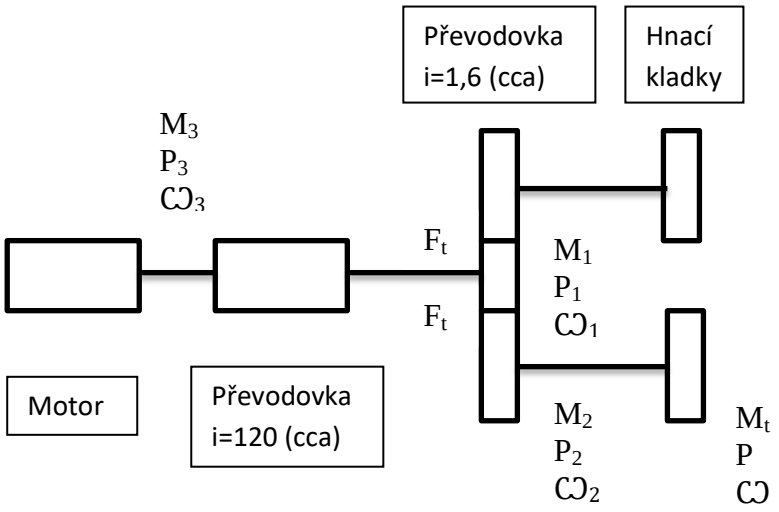
Obr. 39: Náčrt výsledného mechanismu

Jak již bylo výše nastíněno, výsledný mechanismus bude složen celkem ze dvou dvojic kladek. V dvojici bude vždy jedna kladka poháněna skrze převodovky od elektromotoru, a druhá kladka bude generovat přítlačnou sílu.

Takto bylo rozhodnuto opět po konzultaci s panem konzultantem Ing. Antonínem Rudolfem. Zdvojení kladkového mechanismu zapříčiní snížení nutné přítlačné síly na kladku. Také v případě extrémně vysokých sil, nutných k vytažení „KNIčka“ nebude mít tato konstrukce problém.

Toto uspořádání ovšem způsobí zdvojnásobení krouticího momentu na pastorku. Z toho důvodu bude nutné provézt nový návrh odstupňované hřídele a tento fakt zohlednit při návrhu per na pastorku.

Výpočet jednotlivých působících krouticích momentů:



Obr. 40: Náčrt mechanismu pohonu zařízení

Známo:

M_t = 65 Nm; $\omega = 1{,}538$

Vypočet:

$$P = M \times \omega = 65 \times 1{,}538 = 99{,}97\ [W]$$

Výpočtový průměr kladky je 65mm. Oproti tomu ozubené kolo má roztečný průměr 67,5 mm, a proto při působení stejného krouticího momentu zde vzniknou menší síly v ozubení. Výpočtová síla v ozubení tedy bude:

$$M_t = M_2 = M$$

$$F_t = \frac{M}{r_{kola}} = \frac{65}{0{,}03375} = 1925\ [N]$$

Tato síla se nám téměř přesně shoduje se silou v ozubení, která byla vypočtena pomocí programu MITCalc.

Hledaný moment M_2 pak lze jednoduše dopočítat z roztečné kružnice pastorku a ze síly F_t, která ovšem působí na dvě kola, tudíž bude dvojnásobná.

$$M_1 = 2 \times F_t \times r_{pastorku} = 2 \times 1925 \times 0{,}02125 = 81{,}8125\ [Nm]$$

$$P_1 = M_1 \times \omega_1 = 81{,}82 \times\ 2{,}463 = 201{,}5\ [W]$$

Účinnosti planetových převodovek jsou dle výrobců cca 75 ÷ 90%. Pomocí tohoto údaje pak lze dopočítat celkový potřebný výkon na elektromotoru.

$$\frac{P_3}{P_1} = \frac{1}{\eta} \quad => \quad P_3 = \frac{P_1}{\eta} = \frac{201{,}5}{0{,}75} = \mathbf{268{,}67}\ [\boldsymbol{W}]$$

Výsledně vybraný elektromotor musí mít tedy minimální výkon přibližně 270 W v případě dvou dvojic kladek. Pro bezpečné zajištění vytažení čidla KNI až s odporem 2 000 N by to bylo řešení s jednou dvojicí kladek dostatečné, ovšem s ohledem na bezpečnost, spolehlivost
a nepředpokládatelné situace budou použity dvě dvojice kladek.

Pro dodržení stanovené rychlosti výsuvu čidel, by zlovený elektromotor měl mít ideálně otáčky 2822 [ot/min]. Pokud se v nabídkách výrobců nepodaří najít přesně tyto otáčky, postačí přibližná hodnota, jelikož je stroj velmi z převodovaný (do pomala), odchylka od výsledné rychlosti výsuvu bude velmi malá.

Výsledný zvolený elektromotor byl také vybírán podle toho, v jakém prostředí bude pracovat. Mezi jeho hlavními parametry je samozřejmě výkon a otáčky motoru, ovšem důležitá budou
i jiná hlediska. Například jako nehodící se typ motoru můžeme označit všechny, jež jsou chlazeny za pomocí ventilátoru. Ventilátor by mohl způsobovat víření prachu v prostředí kontejnmentu a tím nebezpečí pro obsluhující pracovníky. Dalšími parametry byly zkušenosti konzultantů ze Škoda JS.

Po zohlednění všech vlivů byl vybrán elektromotor od firmy Omron s označením R88M-K40030S-BS2. Tento elektromotor má dostatečný výkon (400 W) a pracuje při 3 000 otáčkách. Podrobné informace o tomto pohonu jsou k dohledání na internetových stránkách výrobce. [17]

Dále byla do výsledné konstrukce také vybrána planetová převodovka, s požadovaným převodovým poměrem i = 120. Výrobce převodovky byl konzultován a odsouhlasen konzultanty ze Škody JS. Planetová převodovka je vyráběna firmou PLE, a tento typ nese označení PLE80. Jedná se o třístupňovou planetovou převodovku, která má účinnost 90% a dokáže přenést krouticí moment o velikosti až 110 [Nm].

Návrh minimálního průměru odstupňované hřídele:

Materiál: ČSN 11 500

Mez pevnosti v tahu: $\sigma_{Pt} = 500$ MPa

Zvolená bezpečnost k = 2,5: $\sigma_{Dt} = \frac{\sigma_{Pt}}{k} = 200$ MPa.

Dovolené namáhání v krutu: $\tau_{Dk} = 0{,}6 \times \sigma_{Dt}$

$$\tau_{Dk} \geq \frac{M_t}{W_k} = \tau_{max}$$

Kde:

τ_{Dk} *... Dovolené napětí v krutu*

W_K *... Průřezový modul v krutu*

$$\tau_{max} = \frac{M_t}{W_k} = \frac{\frac{P}{2\pi n}}{\frac{\pi d^3}{16}} \quad => \quad d_{min} = \sqrt[3]{16\frac{\frac{P}{2\pi n}}{\pi \tau_D}} = \sqrt[3]{\frac{16 \times 81{,}82}{\pi \times 120 \times 10^6}} = 0{,}01514\ [m] \cong 16\ [mm]$$

Zvolený minimální průměr je tedy **20 [mm].**

Výpočet spojení pery:

Všechny rotační elementy, jako jsou kladky a ozubená kola, budou na hřídele uloženy pomocí per. Rozměry těchto per jsou vypočítány zde:

Použitý materiál: ocel ČSN 11 500

Mez pevnosti v tahu: $\sigma_{pt} = 500\ [MPa]$

Zvolená bezpečnost k = 2,5

Dovolené napětí na spoj perem: $\sigma_D = \frac{0{,}6 \times \sigma_{pt}}{k} = \frac{0{,}6 \times 500}{2{,}5} = 120\ [MPa]$

Spojení pery bude využito při uložení všech čtyřech kladek, jak hnaných tak přítlačných, dále pro obě ozubená kola a i pro pastorek. Největší krouticí moment působí na pastorku, proto začneme s navrhováním pera pro pastorek.

$$120 \times 10^6 = \sigma_D \geq \frac{\frac{M_t}{\frac{d}{2}}}{k_{ef} \times n_p \times \frac{h_{st}}{2} \times l} = \frac{\frac{81{,}82}{\frac{0{,}0425}{2}}}{1 \times 1 \times \frac{0{,}009}{2} \times 0{,}015} = 57{,}043 \times 10^6 [MPa]$$

Kde:

M_t *... krouticí moment*

d ... průměr pastorku

k_{ef} *... koeficient efektivního počtu nesoucích per*

n_p *... počet per*

h_{st}, *l ... styková výška*

l ... šířka pera

Dle tohoto výpočtu z literatury Příručka strojního inženýra 1 [3], je zde dokázáno, že jediné pero o rozměrech l = 15 mm; h_{st} = 9 mm; je dostačující pro tento spoj. Lze tedy předpokládat, že i pro všechny ostatní případy budou tyto rozměry pera dostatečné, jelikož zde působí menší krouticí moment. Pro ozubená kola bude použito pero o stejných rozměrech, ale pro kladky bude navrhnuto pero o co nejmenší délce.

Pero pro ozubené kolo:

$$120 \times 10^6 = \sigma_D \geq \frac{\frac{M_t}{\frac{d}{2}}}{k_{ef} \times n_p \times \frac{h_{st}}{2} \times l} = \frac{\frac{65}{\frac{0{,}065}{2}}}{1 \times 1 \times \frac{0{,}009}{2} \times 0{,}015} = 29{,}6 \times 10^6 [MPa]$$

Pero pro kladky:

$$120 \times 10^6 = \sigma_D \geq \frac{\frac{M_t}{\frac{d}{2}}}{k_{ef} \times n_p \times \frac{h_{st}}{2} \times l} = \frac{\frac{65}{\frac{0{,}065}{2}}}{1 \times 1 \times \frac{0{,}009}{2} \times 0{,}007} = 63{,}5 \times 10^6 [MPa]$$

Pro kladky bude tedy použito pero jedno, o celkové stykové délce 7 mm a stejné stykové výšce jako pera předchozí, tedy 9 mm.

Nyní zbývá správně navrhnout ložiska pro uložení všech hřídelí.

Volba ložisek:

Výpočtová obvodová síla: $F_t = 1910{,}8$ [N]

Výpočtová radiální síla: $F_r = 695{,}5$ [N]

Výpočtová axiální síla: $F_a = 0{,}0$ [N]

Tyto síly jsou síly, které působí v ozubení. Zajímavé z pohledu ložisek jsou hodnoty axiálních a radiálních sil. V našem případě je axiální síla nulová, tudíž by teoreticky mohla stačit pouze radiální ložiska. S ohledem na důležitost stroje a na možné finanční obtíže při jeho poruše, by byly ideální k použití radiálně axiální, zapouzdřená, jednořadá kuličková ložiska. Ten druh se primárně řadí pod radiální ložiska s tzv. schopností udržovat i axiální polohu. Jejich návrh a případnou změnu druhu ložiska je nutné ověřit výpočtově. Jelikož otáčky tohoto stroje jsou velice nízké (25 $[ot/min]$ pro odstupňovanou hřídel a 15,6 $[ot/min]$ pro hnací a přítlačné hřídelky), výpočet ložisek bude proveden pouze staticky, protože žádné velké dynamické síly se zde nedají očekávat. Možná nepřesnost výpočtu je kompenzována vysokou statickou bezpečností ($s_0 = 5$).

Výpočet ekvivalentního zatíženi: F_e

$$F_e = F_r \times X_1 + F_a \times Y_1$$

Výpočet koeficientů X, Y:

Koeficienty se vypočítávají podle následující rovnice, kdy se porovnávají s hodnotou výpočtového součinitele e = 1,14 pro tento druh ložisek. [24]

$$\frac{F_a}{F_r} < e \Rightarrow X_1 = 1, Y_1 = 0$$

$$\frac{F_a}{F_r} > e \Rightarrow X_2 = 0{,}7, Y_2 = 3{,}8$$

V tomto případě platí že:

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{0}{695{,}5} = 0 < e = 1{,}14$$

Pak tedy:

$$X_1 = 1, Y_1 = 0$$

$$\boldsymbol{F_e} = F_r \times X_1 + F_a \times Y_1 = 695{,}5 \times 1 + 0 \times 0 = \mathbf{695{,}5}\ [\boldsymbol{N}]$$

Nyní přejdeme k výpočtům zatížení ložisek:

$$P_o = F_e \leq \frac{C_o}{s_o}$$

Kde:

P_0 *... Maximální zatížení ložiska*

F_e *... Statické radiální zatížení*

C_0 *... Základní statická únosnost*

s_0 *... Bezpečnost statická (zvoleno 5)*

V případě malých hřídelů vypadá výpočet následovně:

$$C_o \geq F_e \times s_o = 695{,}5 \times 5 = 3\,477{,}5\ [N]$$

V případě odstupňovaného hřídele pak takto:

$$C_o \geq F_e \times s_o = 2 \times 695{,}5 \times 5 = 6\,955\ [N]$$

Ložiska byla vybrána od firmy SKF, dle jejich online katalogů. Byl zvolen již zmíněný typ ložisek - radiálně axiální (= s kosoúhlým stykem), zapouzdřená, jednořadá kuličková ložiska. Pro menší hřídelky o průměru 15 mm byl zvolen typ 7302 BE-2RZP, a pro odstupňovanou hřídel pak větší ložiska typu 7304 BE-2RZP.

Jejich statické a dynamické únosnosti jsou uvedeny zde:

7302 BE-2RZP: $C_o = 6\,700\ [N]; C = 13\,000\ [N]$

7304 BE-2RZP: $C_o = 9\,500\ [N]; C = 17\,400\ [N]$

Oboje dvoje tyto ložiska i s bezpečností $s_0 = 5$ jsou O.K.

Výpočet trvanlivosti ložisek:

$$L = \left(\frac{C}{F_e}\right)^p = \left(\frac{13\,000}{695{,}5}\right)^3 = 6530{,}4\ [1 \times 10^6\ ot.]$$

$$L = \left(\frac{C}{F_e}\right)^p = \left(\frac{17\,400}{2 \times 695{,}5}\right)^3 = 1957{,}3\ [1 \times 10^6\ ot.]$$

Kde:

L ... základní trvanlivost (to je hodnota otáček, kterou přesáhne minimálně 90% vyrobených ložisek při daném zatížení).

p ... součinitel, pro bodový styk (= kuličková ložiska) je roven třem.

Výpočet životnosti ložisek:

$$L_h = \frac{16\,667}{n} \times \left(\frac{C}{F_e}\right)^p = \frac{16\,667}{15{,}6} \times 6530{,}4 = 6{,}98 \times 10^6\ [hod]$$

$$L_h = \frac{16\,667}{n} \times \left(\frac{C}{F_e}\right)^p = \frac{16\,667}{25} \times 1957{,}3 = 1{,}31 \times 10^6\ [hod]$$

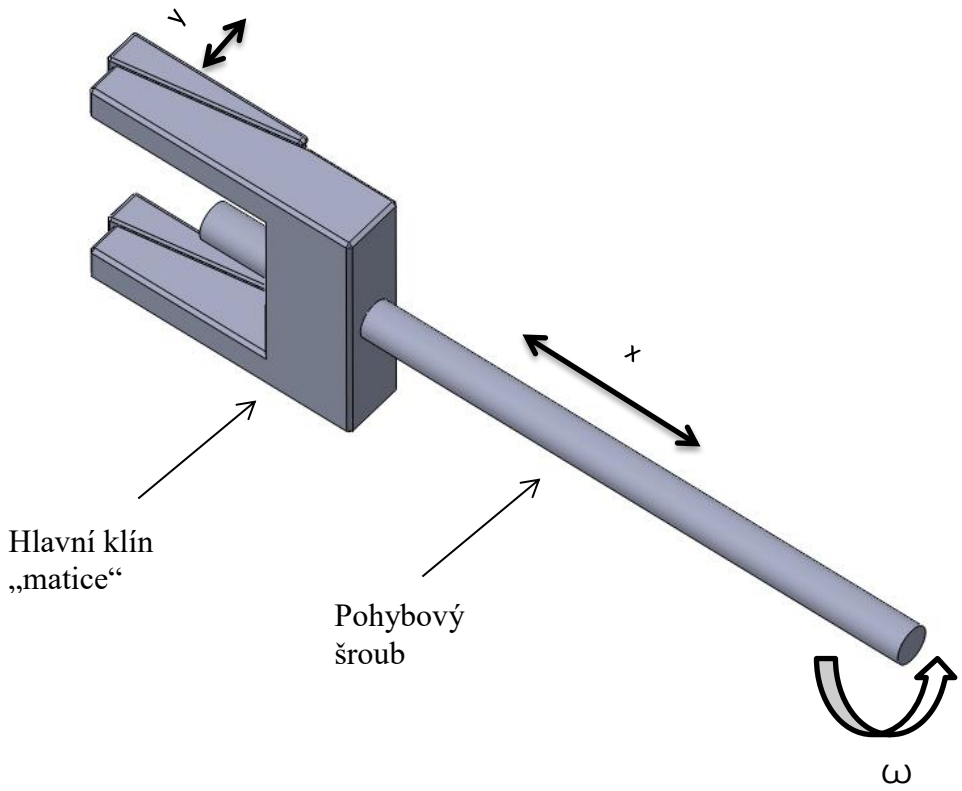
Kde:

L_h *… životnost ložisek (to je hodnota v hodinách, kterou minimálně ložisko dosáhne).*

n … otáčky za minutu

Výpočet pohybového šroubu:

Pohybový šroub je mechanismus, který přetváří rotační pohyb v posuvný. Existuje několik způsobů, jak tuto transformaci lze realizovat. V případě tohoto zařízení bude využito řešení, kdy se „šroub otáčí a matice se posouvá“. Využije se zde buď plošného styku v závitu, kde bude tedy docházet ke tření v závitu, nebo tzv. „kuličkového šroubu“. Přibližné schéma celého přítlačného mechanismu je naznačeno na obrázku níže.



Obr. 41: Schéma přítlačného mechanismu

Princip celého mechanismu je zde naznačen. Rotací pohybového šroubu, kterou bude ovládat obsluha, se bude měnit poloha hlavního klínu ve směru osy x. Tímto pohybem se bude nastavovat poloha koncových klínů, které vytváří přítlak na ložiskové domky v zařízení. Jelikož síla zde bude působit pouze ve směru k hlavnímu klínu, bude nejprve navrhnut tzv. pilový závit (= lichoběžníkový nerovnoramenný závit), v případě nevyhovujících výsledků bude použit tzv. „kuličkový šroub“.

O uložení celého mechanismu se bude starat oboustranné axiální ložisko. Šroub bude vyroben z již na specifikované oceli ČSN 11 500 a „matice“ bude vyrobena nejspíše z mosazného nebo bronzového materiálu.

Výpočet:

Mez pevnosti v tahu: $\sigma_{pt} = 500\ [MPa]$

Dovolené napětí pro pohybový šroub: $\sigma_{dov} = 0{,}2 \times \sigma_{pt} = 0{,}2 \times 500 = 100\ [MPa]$

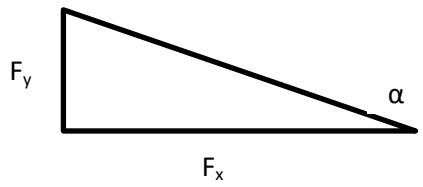
Určení výpočtové axiální síly působící na přítlačné klíny:

Abychom vyvinuli požadovanou maximální přítlačnou sílu na trubičky čidel (2 000 N), je nutné tuto sílu přepočítat v axiálním směru posuvu pohybového šroubu. Ze silového trojúhelníku je tato hodnota vypočtena pro úhel klínů 15°.

Síla F_y musí být minimálně 2 000 N.

Úhel α je 15°.

Sílu F_y hledáme.



$$tg\ \alpha = \frac{F_y}{F_x}$$

$$F_x = \frac{F_y}{tg\ 15°} = \frac{2\ 000}{tg\ 15°} = 7\ 464{,}1\ [N]$$

K této síle musí být přičteny ještě síly od všech osmi pružin, které působí proti síle F_y.

$$F_{AX} = F_x + F_p = 7\ 464{,}1 + 8 \times 30 = 7\ 704{,}1\ [N]$$

Kde:

F_p … působící síla od pružin

Výpočet lichoběžníkového šroubu:

Stoupání p = 2 mm

Šroub: Vnitřní průměr d_3 = 17,5 mm Matice: Vnitřní průměr D = 20,5 mm

Vnější průměr d = 20 mm Vnější průměr D_1 = 18 mm

Střední průměr d_2 = 19 mm Střední průměr D_2 = 19 mm

Průřez jádra závitu: $S_j = \frac{\pi d_3^2}{4} = \frac{\pi \times 0{,}0175^2}{4} = 24{,}053 \times 10^{-5}\ [m^2]$

Kontrola na tah: $\sigma = \frac{F_{AX}}{S_j} = \frac{7\ 704{,}1}{24{,}053 \times 10^{-5}} = 32{,}0\ [MPa]$

Kontrola na krut: $\tau_k = \frac{M_K}{W_K}$

$$M_K = F_{AX} \times \frac{p}{2\pi\eta} = 7\ 704{,}1 \times \frac{2}{2 \times \pi \times 0{,}183} = 13\ 400{,}5[Nm]$$

Kde:

M_k ... krouticí moment

p ... stoupání

η ... účinnost převodu (účinnost těchto převodů je uváděna 70%÷90%)

$$\eta = \frac{tg\alpha}{tg(\alpha + \varphi)} = 0{,}183$$

$$tg\alpha = \frac{s}{\pi d_2} = \frac{2}{\pi 19} = 0{,}0335$$

$$tg\varphi = f = 0{,}15$$

Kde:

d_2 ... střední průměr závitu

f ... součinitel tření (= 0,1÷0,2), zvoleno f = 0,15

$$\tau_k = \frac{M_K}{\frac{\pi d_3^3}{16}} = \frac{13\ 045{,}5}{\frac{\pi \times 0{,}0175^3}{16}} = 12\ 397\ [MPa]$$

Z důvodu velice vysoké hodnoty krouticího momentu, a tudíž velmi vysokému napětí v krutu, je nutné přistoupit ke konstrukci s kuličkovým šroubem. Převod kuličkový šroubem má totiž výrazně vyšší účinnost převodu, díky valení kuliček, a proto by se měl stát vyhovujícím řešením. Návrh kuličkového šroubu je velice podobná navrhování ložisek.

Výpočet kuličkového šroubu:

Trvanlivost L kuličkového šroubu by měla být rozhodně vyšší než 1×10^6 [ot]. Pro ověřovací výpočty byl zvolen kuličkový šroub od firmy Nanjing Technical Equipment Manufacture Co.

Jeho parametry jsou: d_0 = 20 mm, stoupání p = 4 mm, C_0 = 16 100 N, C = 6 700 N.

$$\mathrm{L} = \left(\frac{\mathrm{C_0}}{\mathrm{F}}\right)^3 = \left(\frac{16\ 100}{7\ 500}\right)^3 = 9{,}9\ [\times 10^6\ \mathrm{ot}]$$

Životnost tohoto druhu kuličkového šroubu je vyčíslena takto:

$$\mathrm{L_h} = \left(\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{F}}\right)^3 \times \frac{16\ 667}{\mathrm{n}} = \left(\frac{6\ 700}{7\ 500}\right)^3 \times \frac{16\ 667}{10} = 1\ 188{,}2\ [\mathrm{hod}]$$

Při použití šroubů s větší délkou je zapotřebí také zkontrolovat možný vzpěr této součásti. Vypočteme maximální kritickou sílu, kterou se při dané délce šroub může přenést.

$$F_{krit} = k \times \frac{E \times I}{L_{š}^2} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \times \frac{210 \times 10^3 \times 7\ 854}{400^2} = 10\ 308{,}4[N]$$

Kde:

k ... konstanta dle uložení

Uložení, kdy na jednom konci je oboustranné axiální ložisko má tuto konstantu $k = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2$

E ... Youngův modul pružnosti v tahu [GPa]

I ... kvadratický moment průřezu šroubu [mm^4]

$$I = \frac{\pi d_2^4}{64} = \frac{\pi \times 20^4}{64} = 7\ 854\ [\mathrm{mm^4}]$$

$L_{š}$ ... délka šroubu [mm]

Jak již bylo řečeno, proti síle kuličkového šroubu budou také působit síly od pružin. Jejich parametry jsou zde.

Parametry pružinek:

Průměr drátu d = 1,6 [mm]

Průměr pružiny D = 11,6 [mm]

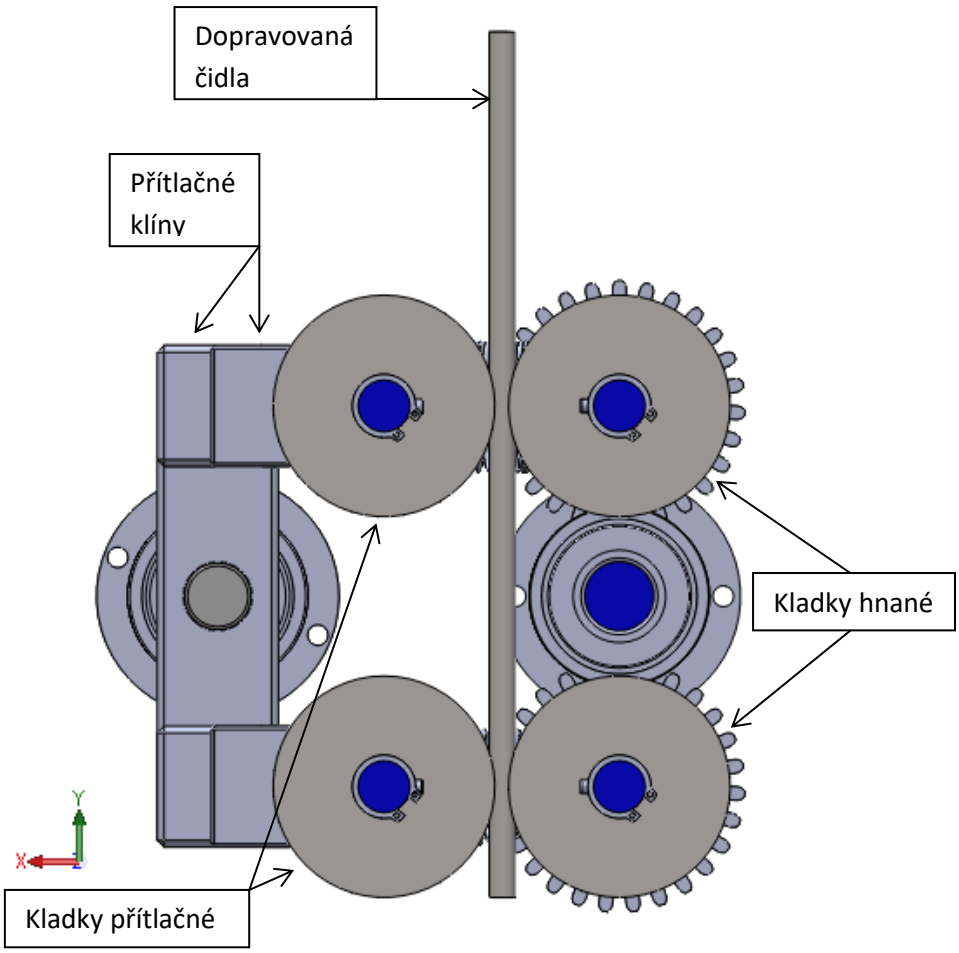
Volná délka pružiny L_0 = 19 [mm]

Délka pružiny v stlačeném stavu L_∞ = 12,3 [mm]

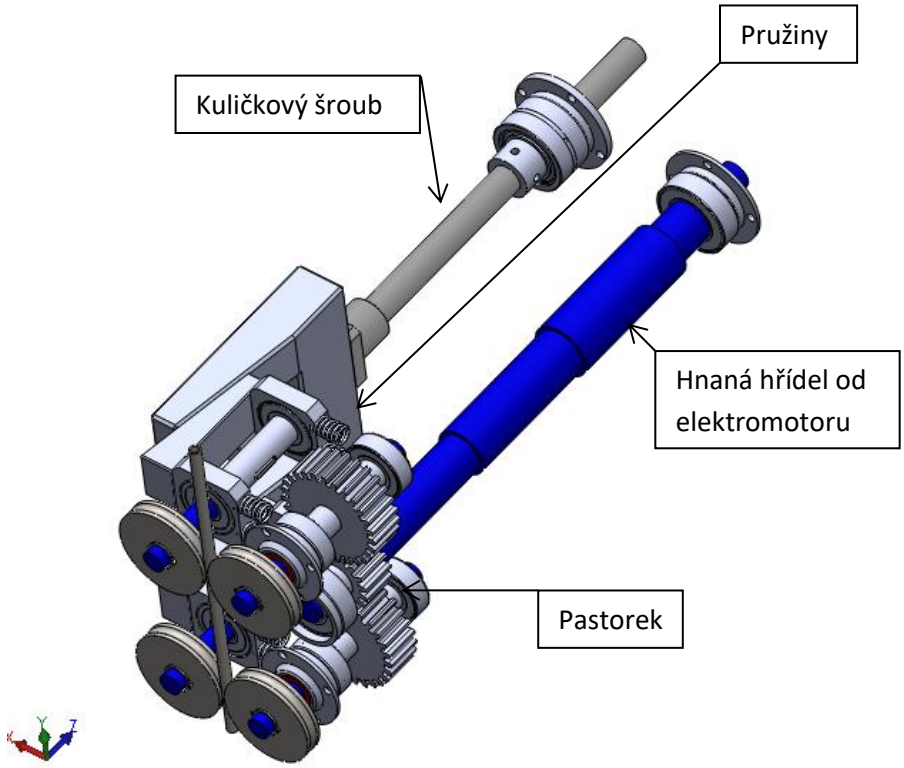
Tuhost pružiny: c = 14,66 [N/mm] (přírůstek síly při stlačení o 1 [mm])

Informace ohledně použitých tlačných pružin byly čerpány z online katalogových listů výrobce pružin. Více informací viz zdroj č 16. [16]

Konstrukce mechanismů podavače:



Obr. 42: Výsledné mechanismy podavače



Obr. 43: Výsledné mechanismy podavače axonometrický pohled

Výsledný mechanismus pohonu se tedy skládá z dvojice hřídelí, na jejichž konci se nachází hnané kladky. Tyto hřídele jsou uloženy v jednořadých, kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem. Obě hřídele jsou osazeny ozubenými koly, skrze které je přenášen hnací moment od pastorku. Pastorek se nachází na hlavním, odstupňovaném hřídeli, který je opět uložen v jednořadých, kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem. K pohonu byl navrhnut elektromotor od firmy Omron s označením XY, doplněn planetovou převodovkou PLE 80 s převodovým poměrem i = 120.

Přítlačný mechanismus se skládá z také z dvojice hřídelí, na jejichž konci se nachází přítlačné kladky. Uložení těchto hřídelí je na stejných ložiscích, jako u mechanismu pohonu. Rozdíl vzniká však v tom, že ložiska jsou vložena do dílů o tvaru čtverce. Na tyto čtvercové díly působí z jedné strany síly od pružin a z druhé strany síla od pohyblivého klínu. Rovnováha těchto sil určuje výslednou polohu celého systému komponent (čtvercové díly, ložiska, hřídele, kladky). Síla na přítlačné klíny je přenášena skrze pohybový šroub. Tento šroub je uložen na oboustranném axiálním ložisku a může být hnaný například elektromotorem.

Ve výrobní dokumentaci k těmto klínům pak musí být uvedeno správné tepelné zpracování, aby nemohlo docházet k zadírání těchto klínů. Je doporučeno zvolit pro každý klín rozdílné tepelné opracování. Například jeden zakalit a druhý nitridovat.

XVI. VÝPOČTY DEFORMACÍ METODOU MKP

Poslední, ale velice důležitou, kapitolou této diplomové práce je návrh tvaru kladek, použitých v podávacím mechanismu. Tvar kladek totiž ovlivňuje, zda se kladky s dopravovanými trubičkami budou dotýkat v bodě, ve více bodech nebo zda půjde o čárový styk. Tvar kladek tedy velice ovlivní vznikající napětí v materiálu trubičky a tím i následné deformace. K tomu navíc je potřeba zajistit, aby maximální deformace trubičky čidla KNI nepřesahovala povolenou deformaci. Tento rozměr je dán naváděcími průvlaky za podávacím zařízením, které „KNIčka“ směřují k dalšímu zařízení. Maximální vnější průměr by tedy neměl přesáhnout hodnotu 8 mm, což dovoluje celkovou deformaci maximálně 1 mm na celý průměr čidla.

K těmto výsledků se budeme snažit dopracovat pomocí simulačního programu Ansys Mechanical. Výpočet je prováděn v sekci „Static structural“, statické výpočty. Tento výpočtový program dokáže plně spolupracovat s modelářským programem Solidworsk 2012, ve kterém byly všechny varianty kladek a také celá konstrukce, namodelovány. Tento program využívá tzv. Metodu konečných prvků, která je dnes velice rozšířeným inženýrským nástrojem. Více informací o tomto programu lze dohledat na internetových stránkách www.ansys.com.

Tato metoda slouží k simulaci vzniklého napětí, proudění, toku tepla a také deformací, což je pro náš případ to nejdůležitější. Jedná se tedy o metodu numerickou, která spočívá v diskretizace daného fyzikálního modelu do určitého (konečného) počtu prvků. Na tomto modelu, v našem případě se jedná o dvojici kladek uložených na hřídelích, které mezi sebou svírají trubičku čidla KNI, se nejdříve vytvoří síť konečných prvků. Na této síti pak proběhnou, za předem definovaných podmínek, numerické výpočty. Z toho tedy vyplývá, že hustota a kvalita této sítě značně ovlivňuje kvalitu prováděných výpočtů. [13]

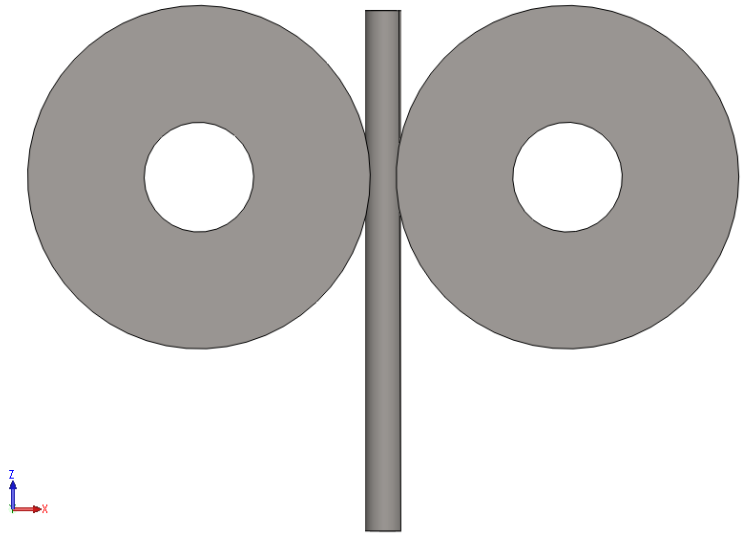
Pro náš výpočet jsou nejdůležitější celkové deformace trubičky. Zajímá nás tedy, jak moc se přetvoří vnější rozměry trubičky, po tom co projde podávacím zařízením.

Výpočtové modely (varianty)

Aby bylo možné začít s výpočty, nutně se musel vytvořit výpočtový model. Výpočtové modely jsou od reálných modelů značně odlišné. Jsou zjednodušené. Výpočtové modely se v tomto případě vždy skládají z dvojice kladek, které mezi sebou svírají trubičku. To, že jsou kladky uloženy na hřídelích, hřídele v ložiskách atd. je nahrazeno okrajovými podmínkami výpočtu. Výpočtové modely se co možná nejvíce zjednodušují a to kvůli jejich náročnosti na výpočtová zařízení. Čím větší síť konečných prvků navrhneme, slovem „větší“ je myšleno s více výpočtovými uzly, tím je výpočet náročnější. A tím bude i déle trvat. Může se tak stát i v tomto případě a pak by se výpočtový model musel dále zjednodušovat. Například pomocí rovin symetrie.

Tento model byl vytvořen v již zmíněném programu SolidWorks 2012. Konkrétně se jednalo o sestavu modelů, která se vždy skládala z dvojice kladek, mezi nimiž byla uložena dopravovaná trubička.

Výpočtový model pro tento mechanismus vypadá takto.



Obr. 44: Výpočtový model, schéma shodné pro všechny varianty

Následně, bylo nutné tento model přemístit do výpočtového programu Ansys. To se zdařilo pomocí sekce „Mechanical model“ a nahrání dat přímo ze složky, kam byly ukládány z programu Solidworks 2012.

Celkem bylo navrženo šest různých geometrií kladek. Každá geometrie má rozdílnou styčnou část s dopravovaným „KNIčkem“. Výpočty by nám měli odhalit, který tvar je nejvhodnější pro účely tohoto zařízení. Rozdílný tvar kladek způsobí vznik rozdílné napjatosti v trubičkách a tím vzniknout i rozdílné hodnoty deformací. Tyto hodnoty budou pak určující v posouzení, která z kladek je nejvíce vhodná.

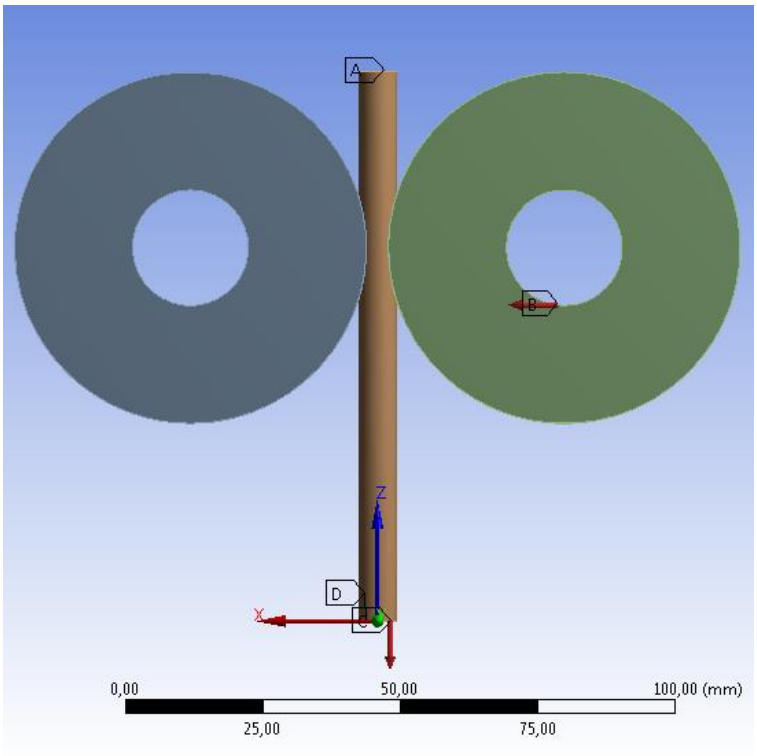
Každý výpočtový model bude podroben celkem čtyřem výpočtům. Všechny kladky budou propočítány pro čidla KNI a pro termočlánky. Zároveň všechny kladky podrobíme dvojímu zatížení. Očekávanému zatížení 190 N a maximálnímu zatížení 2 000 N.

Okrajové podmínky

Okrajové podmínky jsou takové podmínky, které nám simulují reálné zatížení námi zkoumaného mechanismu. Například to, že v modelu není přítomný hřídel, na kterém je kladka uložena, je nahrazeno okrajovou podmínkou. Tato okrajová podmínka je vázána k ploše, kde se v realitě hřídel nachází.

V případech velmi složitých výpočtů, jak již bylo naznačeno, lze použít i zjednodušujících okrajových podmínek – symetrie. Tato podmínka lze použít tam, kde je zkoumaná komponenta symetrická podle jakékoli roviny. V našem případě jsou tyto roviny tři. Pokud by výpočty byly nadměrně časově náročné, je tedy možnost úlohu dále zjednodušit.

Na obr. 43 jsou vidět okrajové podmínky, které byly použity v tomto výpočtu. Okrajové podmínky jsou pro všechny varianty totožné, anebo velice podobné. Jediná odlišnost je pouze ve velikosti přítlačné síly B, buď je použita hodnota 190 N, nebo 2 000 N.



Obr. 45: Okrajové podmínky výpočtu

Na obrázku jsou vidět celkem čtyři okrajové podmínky A, B, C, D. Ve skutečnosti jich je použito pět, protože okrajová podmínka A se váže k dvěma plochám.

Okrajová podmínka A – Fixed. Tato okrajová podmínka zajistí, že se námi označené plochy nebudou nikam posouvat. Podmínka je navázána na horní okraj trubičky a také na vnitřní plochu kladky po levé straně (není vidět na obrázku).

Okrajová podmínka B – Force. Podmínka Force, jak již název napovídá, prezentuje působící sílu. Tato podmínka je navázána opět na vnitřní plochu, tentokráte však kladky vpravo. Tato podmínka, jak již bylo řečeno výše, má celkem dvě výpočtové hodnoty: 190 N a 2 000 N.

Okrajová podmínka C – Force. Opět síla, která prezentuje gravitační tíhu trubičky a možné vzniklé silové odpory při jejím vytahování. Jedná se o sílu svázanou se spodní plochou trubičky, kdy její velikost je 30 N.

Okrajová podmínka D – Displacement. Tato podmínka je vázána na spodní plošku trubičky, kdy lze nastavit, v jakém směru se tato plocha může pohybovat v průběhu výpočtu. Nejvíce se osvědčilo nastavení, kdy byl zamezen pohyb této plochy ve všech osách. Tudíž z toho vznikla stejná okrajová podmínka jako Fixed.

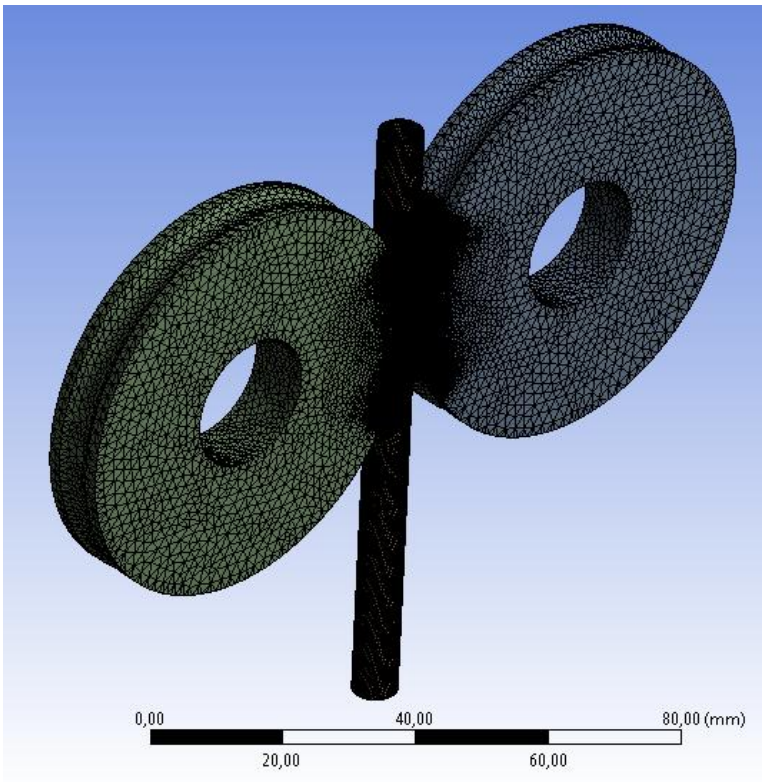
Takovým to nastavením okrajových podmínek je jasné, že maximální deformace nebude vznikat v trubičce, ale na vnějším okraji kladky, na kterou je navázána okrajová podmínka B. Tyto deformace nejsou ale vůbec relevantní a nebudou ve výsledcích komentovány. Sice v těchto místech bude fakticky největší generovaný posuv, ale nikoli deformace. Výpočty jsou prováděny však kvůli zjištění deformací trubiček. A proto jako hlavní výstup bude zjištění deformací v oblasti styku trubičky s kladkami.

Síť metody konečných prvků

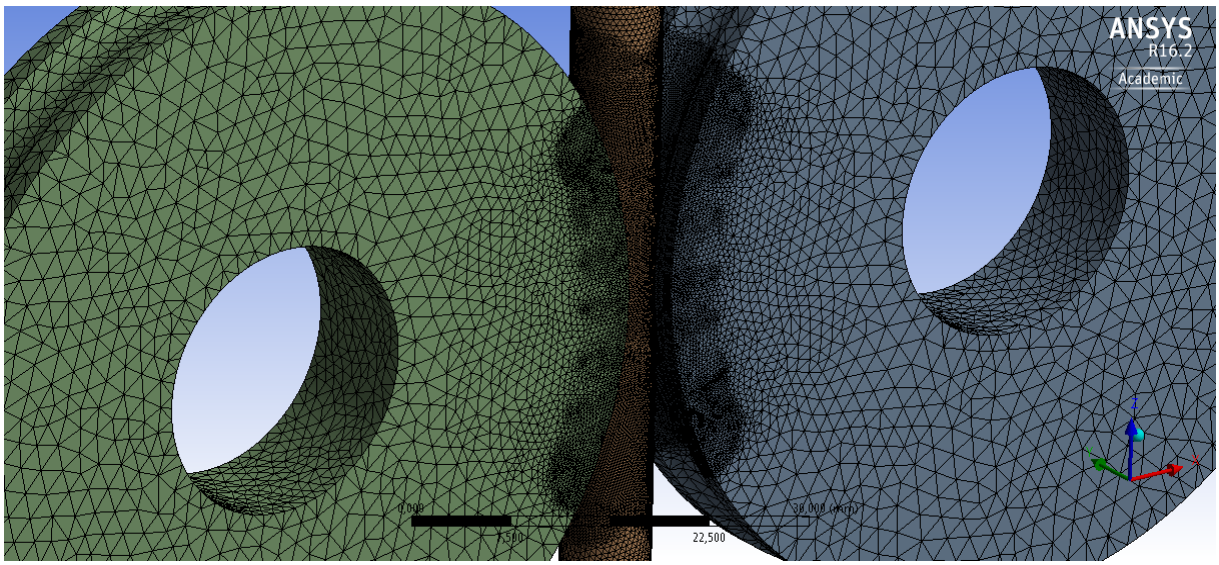
Síť metody konečných prvků je nastavena pro všechny výpočty totožně, a proto zde bude ukázána názorně na jedné variantě a nebude dále popisována u každé varianty zvlášť.

V sekci „Mechanical model“ je záložka „Model“, která nás při jejím spuštění přesměruje do programu Ansys Mechanical. V tomto novém prostředí je nutné vytvořit již výše zmíněnou síť konečných prvků. Sítě u těchto výpočtových modelů jsou nastaveny tak, že se generují zvlášť pro dvojici kladek a zvlášť pro trubičku KNI (nebo termočlánku). Maximální velikost buňky na trubičce může být XYZ mm.

Síť metody konečných prvků byla tvořena s ohledem na výsledky, kterých chceme dosáhnout. To znamená, že síť je nejhustší v místě styku kladek a trubiček a naopak na zbytku tělesa kladky je síť jemná, zde nás výsledky nezajímají a zbytečně by se tak prodlužovala dobu výpočtu. V průměru bylo použito XXX buněk. Buňky jsou YYY a jejich maximální velikost v oblasti dotyku obou těles je nastavena na hodnotu ZZZ mm. Jak tato síť konečných prvků vypadá, je vidět na obrázcích 44. a 45.



Obr. 46: Síť metody konečných prvků

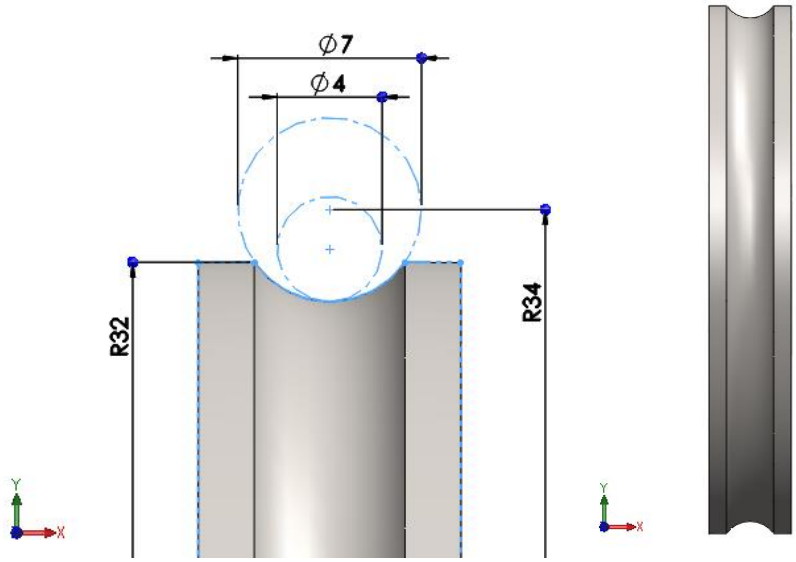


Obr. 47: Detail sítě MKP v místě styku kladek a trubičky

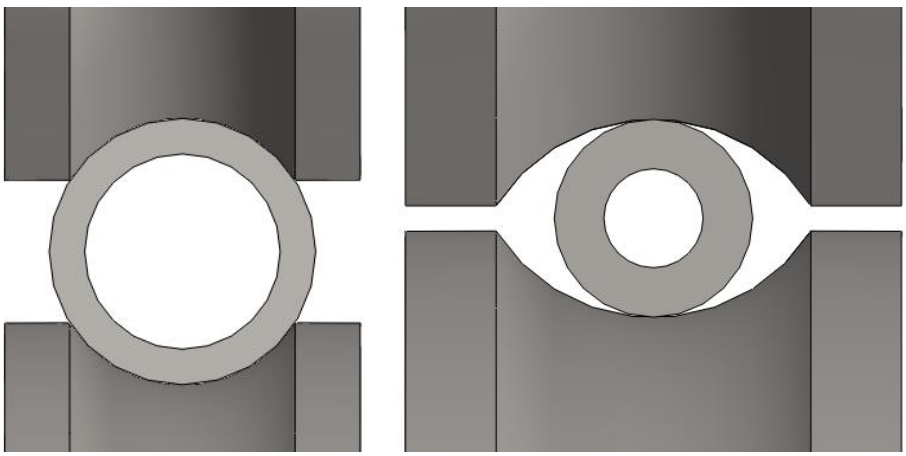
Navržené varianty geometrie kladek

1. Varianta

První varianta je zaměřena na co možná nejnižší hodnoty deformací pro čidlo KNI. Tvar této kladky kopíruje tvar trubičky čidla KNI. V případě sevření trubičky mezi dvěma kladkami, je čidlo téměř celé opásané a tím je zapříčiněno co možná největšího styku mezi kladkami a čidlem KNI, tím pádem se napětí rozloží po téměř celém průřezu trubičky. Mezi kladkami je mezera 4 mm, aby i v případě vytahování termočlánků byla tato kladka použitelná.



Obr. 48, 49: Tvar a rozměry kladek varianty 1



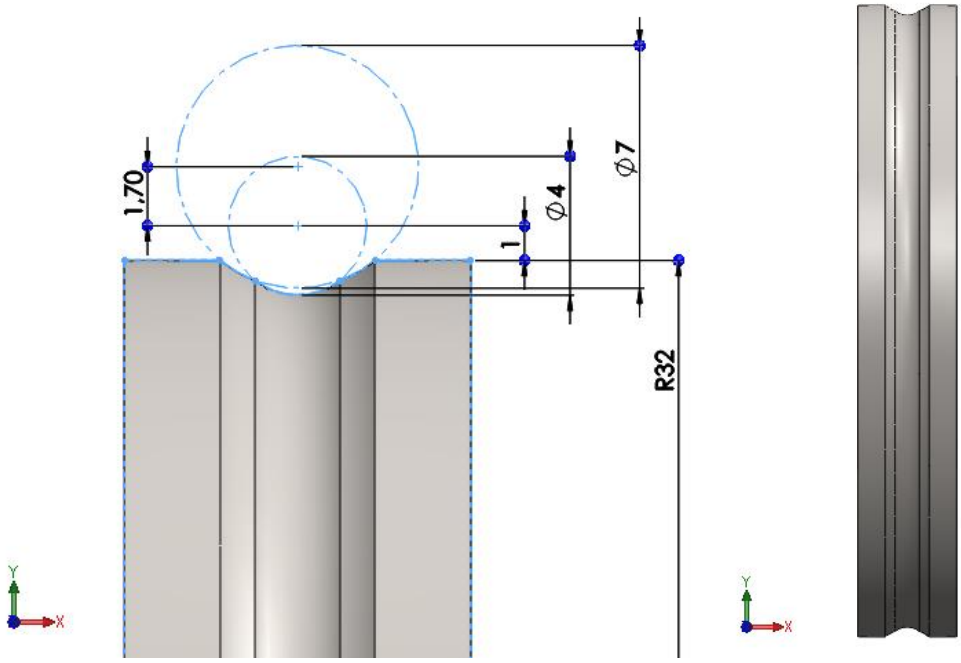
Obr. 50, 51: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

Nevýhoda této varianty přichází v případě vytahování termočlánku. Termočlánek díky svému menšímu průměru bude mít pouze bodový styk s oběma kladkami. Pokud budeme

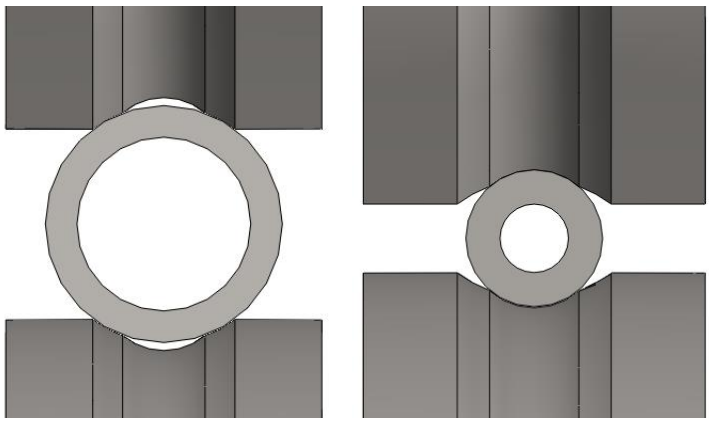
uvažovat určitou deformaci termočlánku, může a také pravděpodobně dojde k plošnému styku, avšak oproti velikosti plochy u čidel KNI jde o malé plošky. Tvar kladky je konstruován tak, že při sevření termočlánku by byla mezera mezi kladkami 1 mm.

2. Varianta

Druhá varianta je ze všech variant ta geometricky nejsložitější. Tvar je inspirován první variantou, ovšem je uzpůsoben jak pro vytahování čidel KNI, tak i pro vytahování termočlánků. Obě dvě trubičky jsou totiž opásány ve značné části svého obvodu, a tudíž by vzniklé deformace pro oba druhy trubiček mohly být přijatelné. Trubička čidla KNI je opásána celkem na čtyřech částech svého obvodu (na každé kladce dvě stykové úsečky). Oproti tomu trubička termočlánku je opásána na dvou úsečkách, které ovšem při vztažení na průměr trubičky jsou minimálně stejně tak dobré, jako opásání „KNIčka“.



Obr. 52, 53: Tvar a rozměry kladek varianty 2

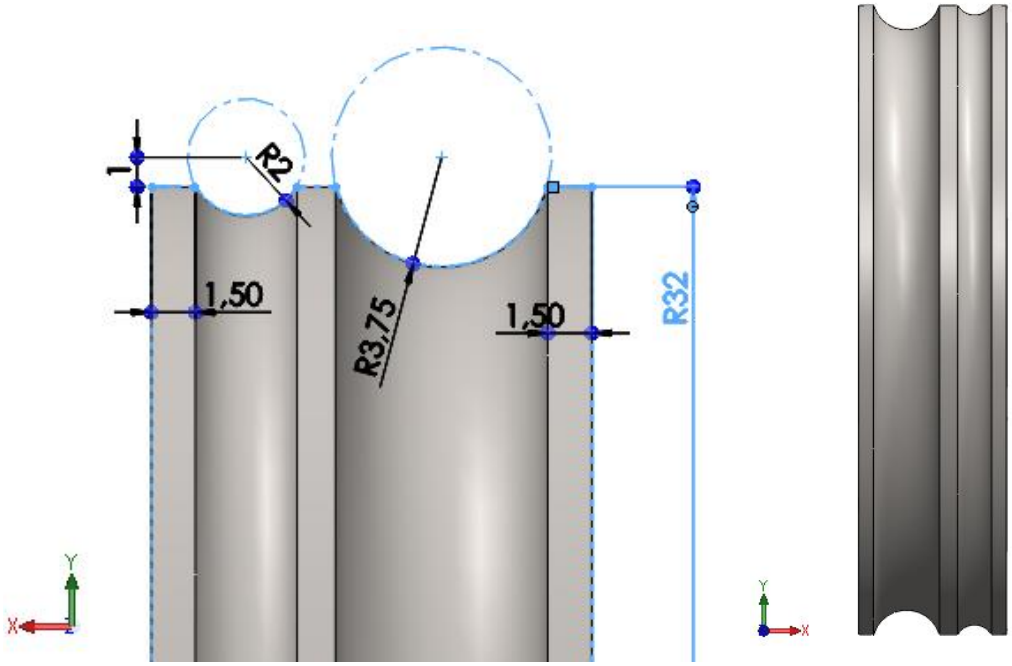


Obr. 54, 55: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

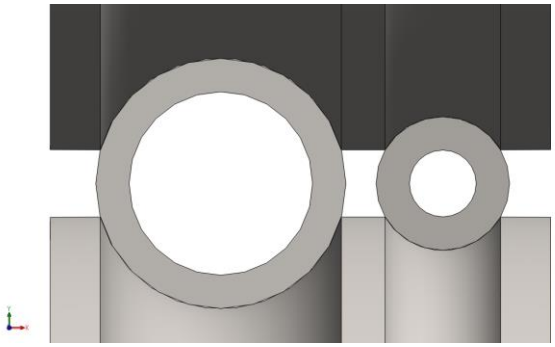
Je zde předpoklad, že trubička čidla KNI se bude deformovat do všech 4 mezer, kde není žádný styk s kladkami. Výsledná deformace by tedy měla být rovnoměrně rozprostřena po celém obvodu, což je pro nás ideální. Výsledná deformace by tedy neměla přesáhnout nadefinované meze. Trošičku horší situace by mohla nastat při vytahování termočlánků, kdy se termočlánky budou rozpínat pouze do dvou stran, a tudíž by se mohli „splácnout“. Na druhou stranu, toto „splácnutí“ hrozí vlastně téměř u všech ostatních variant, protože k tomu při styku dvou kladek jednoduše dochází.

3. Varianta

Třetí varianta jsou vlastně dvě kladky v jedné. Jde o kombinaci dvou předchozích variant. Je zde jiná osa výsuvu pro trubičku od „KNIčka“ a od termočlánku, což povede na speciální tvarové navádění trubiček. Aby se nemohlo stát, že trubička „KNIčka“ bude zavedena do té části kladky, která je určena pro vytahování termočlánků a naopak.



Obr. 56, 57: Tvar a rozměry kladek varianty 3



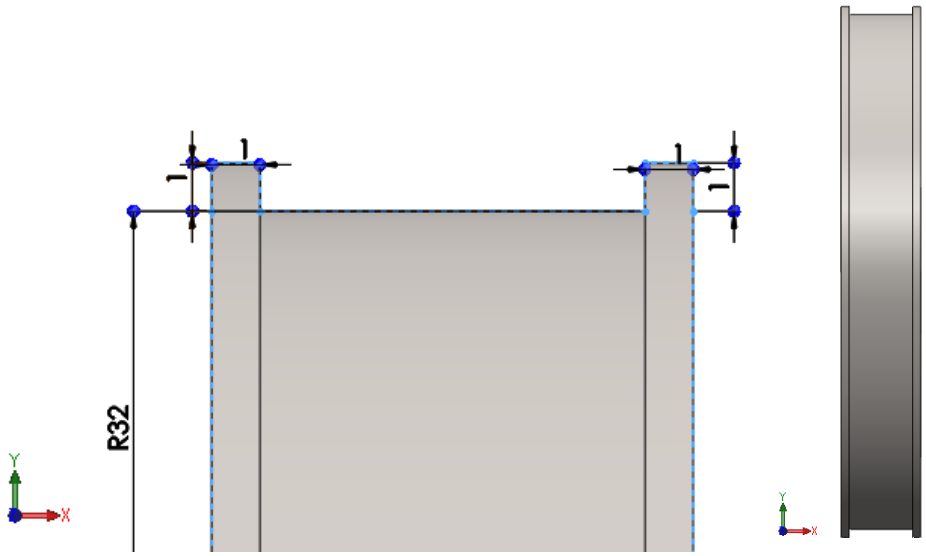
Obr. 58: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

Druhou možností by bylo možné při použití pouze jedné dvojice kladek a dvou průvlaků, co možná nejdále od sebe. Pokud by vzdálenost těchto naváděcích prvků byla dostatečná, kladka by se mohla vystředit a obě trubičky by se při svém vytahování mírně prohnuly. Tyto problémy budou řešeny až při finálním návrhu celé konstrukce, na výpočty toto nemá vliv.

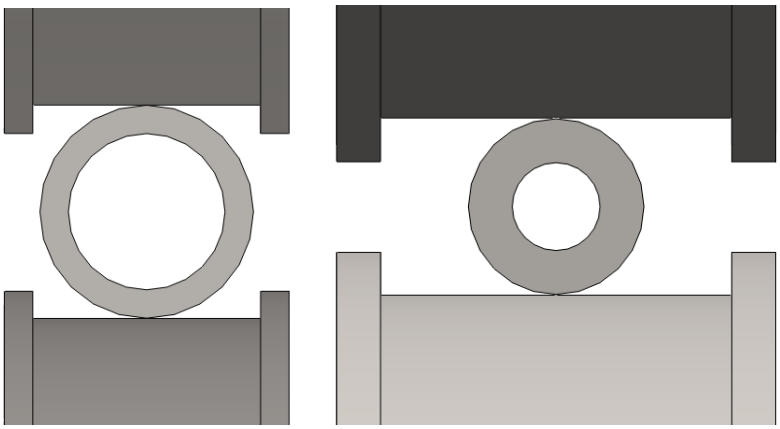
4. Varianta

Tato varianta je zde vložena hlavně z důvodu porovnání. Jedná se o nejjednodušší tvar kladky, která je na okrajích pouze málo osazena, aby nehrozilo vypadnutí trubiček z kladkového mechanismu.

Od této varianty nejsou očekávány nejlepší výsledky, ovšem její výsledky nám velice dobře ukáží, zda má smysl se vůbec tvarovou úpravou kladek dále důkladněji zabývat.



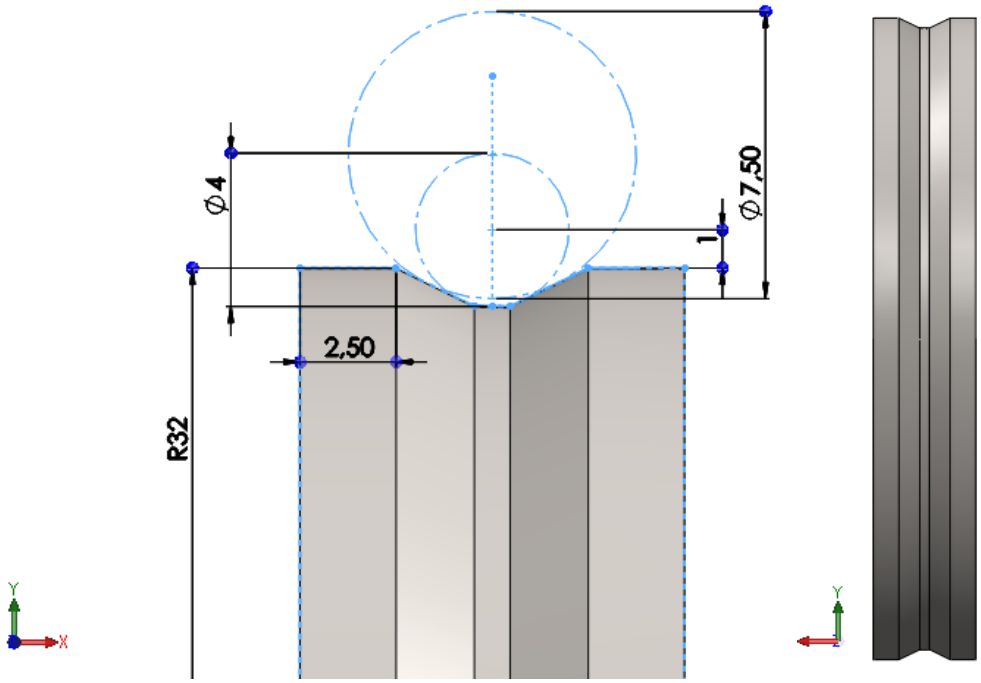
Obr. 59, 60: Tvar a rozměry kladek varianty 4



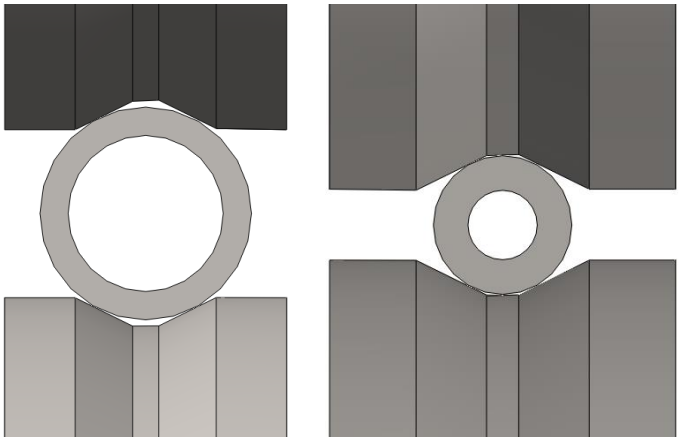
Obr. 61, 62: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

5. Varianta

Pátá varianta vznikla modifikací varianty druhé, přičemž zde bude docházet pouze k bodovému (při připuštění určité deformace k malému plošnému) dotyku. Přičemž pokud se podíváme na obrázek č. XX, kde je sevřená trubička čidla KNI, je vidět že k dotyku dochází celkem ve čtyřech bodech. U termočlánků dojde k dotyku celkem v šesti bodech. V obou případech je však napětí, po celém průřezu, autorem očekáváno rovnoměrně rozložené. Což je žádaný stav, který způsobí nejmenší deformace.



Obr. 63, 64: Tvar a rozměry kladek varianty 5

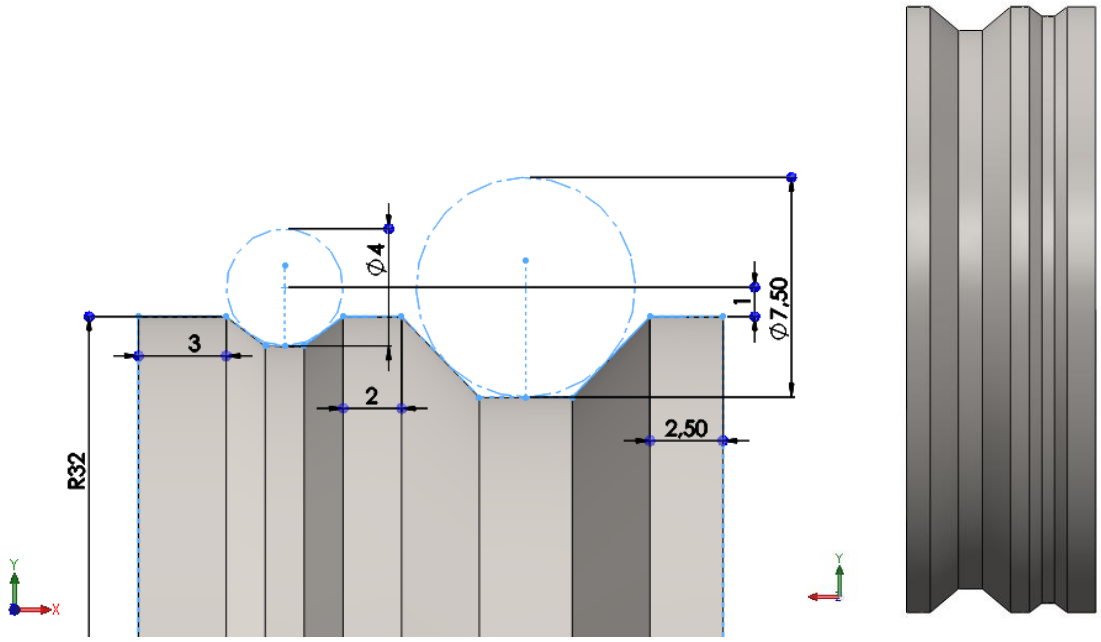


Obr. 65, 66: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

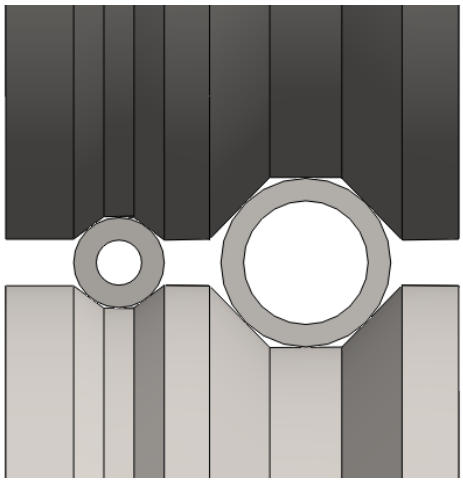
Autor do této varianty, spolu s druhou variantou, vkládá největší naděje na co nejmenší deformace trubiček.

6. Varianta

Poslední varianta je obdoba varianty číslo tři, pouze zde není přesné opásání po co největší části obvodu, ale u obou trubiček bude (teoreticky) docházet pouze k šesti-bodovému dotyku. Bude ovšem velice zajímavé varianty číslo 3 a 6 vzájemně porovnat.



Obr. 67, 68: Tvar a rozměry kladek varianty 6



Obr. 69: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

Každou z těchto variant bylo nutné ověřit jak pro trubičku KNI (průměr 7,5 mm), tak ale i pro trubičku termočlánku (průměr 4 mm). Z tohoto důvodu celkový počet výpočtových modelů vzrostl až na dvanáct. Mohlo se zde ovšem využít toho, že 1. varianta a 3. varianta budou mít pro trubičku KNI totožné výsledky. Stejně tak i 5. varianta a 6. varianta pro trubičku termočlánku. Celkový počet výpočtových úloh je tedy deset.

Každá úloha bude počítána na dvě různá zatížení, dostáváme tedy celkem dvacet výpočtových úloh.

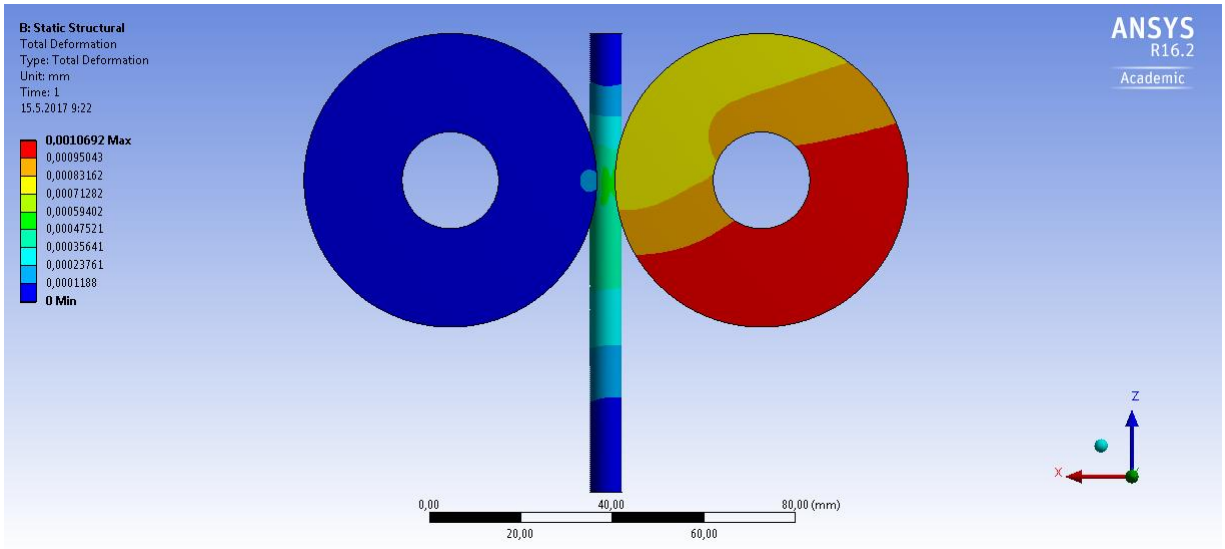
Deformační analýza

Deformační analýza je vlastně výsledek výše popisovaných výpočtů. V sekci „Solutions“ byla zvolena varianta „Total deformation“. V této záložce budou názorně, graficky, prezentovány výsledky, kde zjistíme celkové hodnoty deformací pro všechny varianty. Porovnáním těchto výsledků zjistíme, která z variant je pro nás nejvíce vyhovující a tím pádem, která geometrie kladky způsobuje nejmenší deformaci trubiček.

Výsledky jsou prezentovány pomocí následujících barevných diagramů. U každého diagramu je velice důležitá stupnice v levé části obrázku, která přiřazuje dané barvě reálnou hodnotu deformace. Tyto hodnoty deformací jsou uvedeny v milimetrech a jsou pro nás určující. Na následujících stránkách jsou uvedeny obrázky výsledků deformačních analýz.

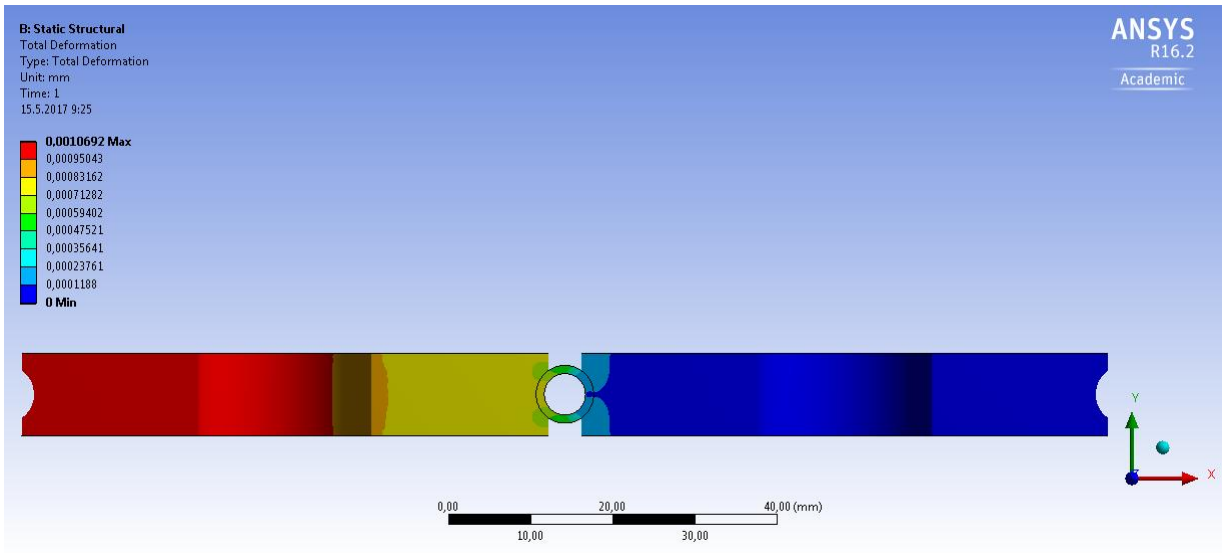
1. Varianta

Jako první případ jsou uvedeny výsledky kladky 1. varianty, za použití trubičky od čidla KNI, s velikostí přítlaku 190 N.



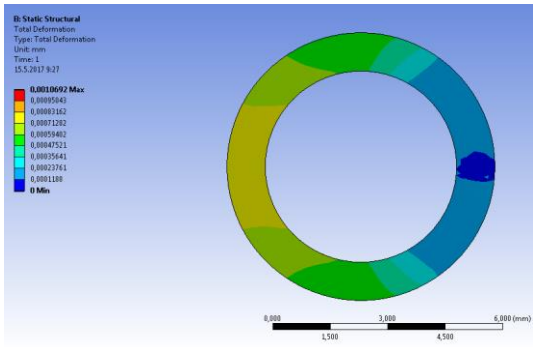
Obr. 70: Celkový pohled na model po výpočtech deformační analýzy

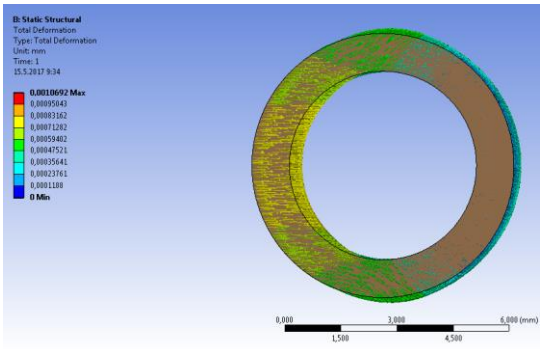
Na tomto obrázku je vidět, že maximální deformace vznikly na kladce, ke které je připojena okrajová podmínka B. Tedy přítlačná síla. Tyto deformace jsou způsobeny postupným sčítáním všech deformací v celém modelu. V realitě ovšem tyto deformace, přesněji posuvy, budou na přítlačné kladce, která se může pohybovat ve směru osy x. Nás na výsledcích této deformační analýzy zajímají deformace, které vzniknou na trubičkách čidel KNI a termočláncích.



Obr. 71: Řez v oblasti styku kladek s trubičkou

V tomto řezu je možné v programu Ansys Mechanical přesně zjistit hodnoty maximálních deformací, které na trubičce vzniknou.





Obr. 72, 73: Detailní pohled na deformace v trubičče čidla KNI a na posuvy v téže trubičce

Nyní by stejný sled obrázků následoval vždy pro výsledky se změněnou okrajovou podmínkou B, tedy přítlačnou silou 2 000 N. A dále pak znovu pro obě tyto síly, ovšem za použití modelu s trubičkou od termočlánku. Obrázky jsou velice podobné, liší se samozřejmě v hodnotách vzniklých deformací. Jelikož by tyto obrázky celou diplomovou práci značně prodloužily, jsou zde uvedeny pouze pro tuto jednu variantu s trubičkou od čidla KNI a přítlačnou silou 190 N. Ostatní obrázky budou nahrazeny následující tabulkou, kde budou uvedeny jednotlivé hodnoty deformací, pro jednotlivé výpočty.

Obrázky všech výpočtových modelů budou k diplomové práci přiloženy na disku CD.

Z výsledků prvního výpočtu je patrné, že deformace se budou pohybovat ve velice malých hodnotách. To je pro nás žádaný stav. Z tohoto důvodu nebyly metodou MKP propočítány varianty 3 a 6. U těchto variant by byly výsledky velice dobré z pohledu vznikajících deformací, ovšem celé dopravované trubičky by byly ohýbány, z důvodu vyosení při

průchodu kladkami. Obě drážky jsou totiž u těchto variant vedle sebe, tudíž by čidla nemohla směřovat přímo do navazujícího pružinového vedení a průvlaků. Tyto dvě varianty byly připraveny pro případ, kdyby se trubičky čidel v ostatních variantách deformovaly příliš.

Vyhodnocení deformací u jednotlivých variant

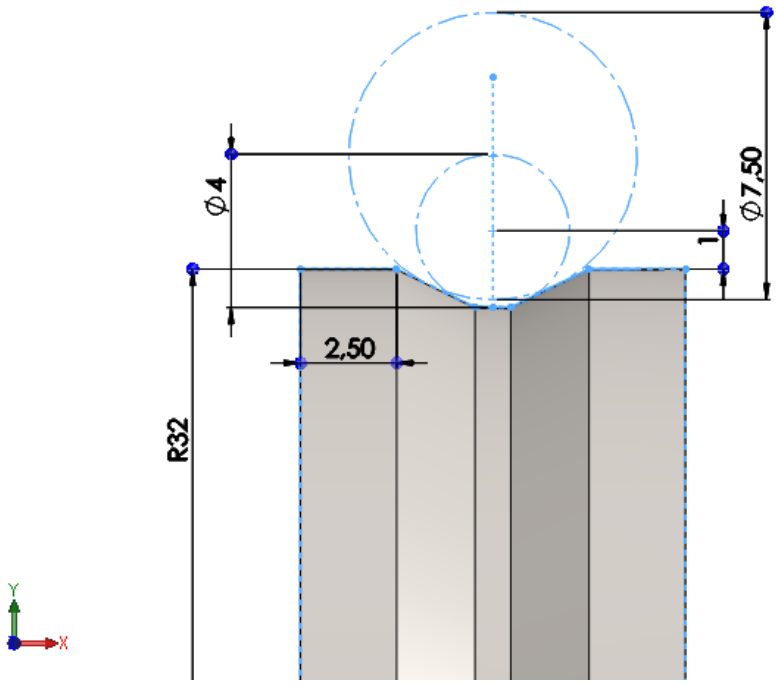
Deformace [mm]	Trubička od čidla KNI		Trubičky od termočlánku	
	Přítlak 190 N	Přítlak 2 000 N	Přítlak 190 N	Přítlak 2 000 N
1. Varianta	0,000 8	0,008 8	0,010 2	0,106
2. Varianta	0,001 9	0,020 1	0,003 3	0,035
4. Varianta	0,004 0	0,042 3	0,009 8	0,110
5. Varianta	0,001 3	0,014 0	0,002 9	0,031

Tab. 9: Výsledky výpočtů deformačních analýz

Pomocí těchto výsledků bylo rozhodnuto, který druh kladek bude použit ve výsledné konstrukci. Velmi neočekávanou hodnotou se prezentuje hned první varianta, při výpočtech s trubičkou od termočlánku. Přítlačná síla 190 N totiž způsobuje dokonce větší deformace, než které vznikají při sevření rovinnou kladkou (4. varianta).

Z těchto výsledků vyplývá, že 1. a 4. varianta mají řádově horší výsledky, než zbylé dvě varianty. Ovšem ale i tyto dvě varianty by byly pro náš stroj použitelné, protože nepřekračují maximální povolenou hodnotu deformace (1 mm).

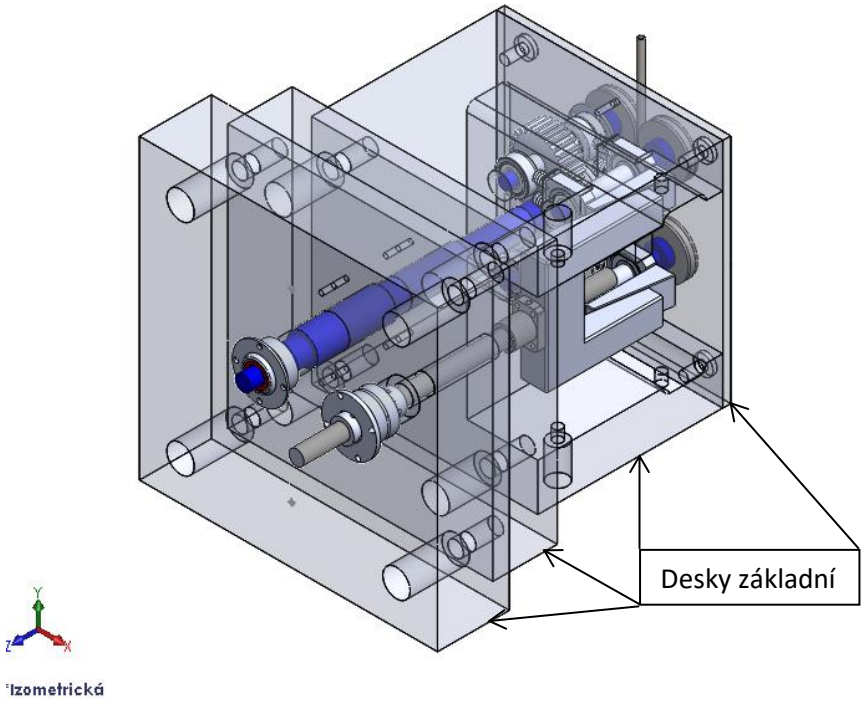
Výsledný varianta byla zvolena podle nejnižších hodnot deformací, které tedy vykazuje 5. varianta geometrie kladek. Její tvar je znovu k vidění zde.



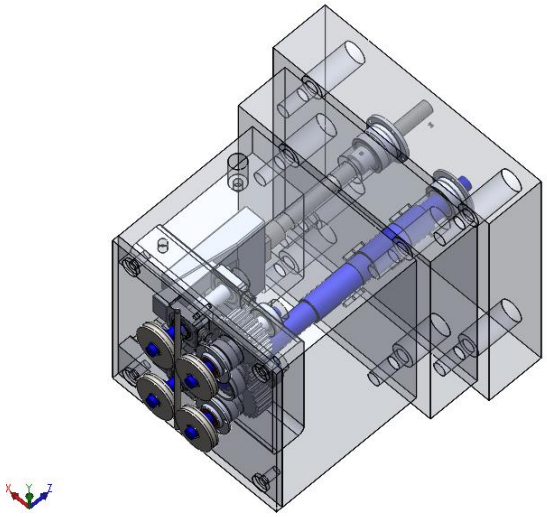
Obr. 74: Zvolená geometrie použitých kladek

XVII. VÝSLEDNÉ KOSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ CELÉHO PODÁVACÍHO ZAŘÍZENÍ

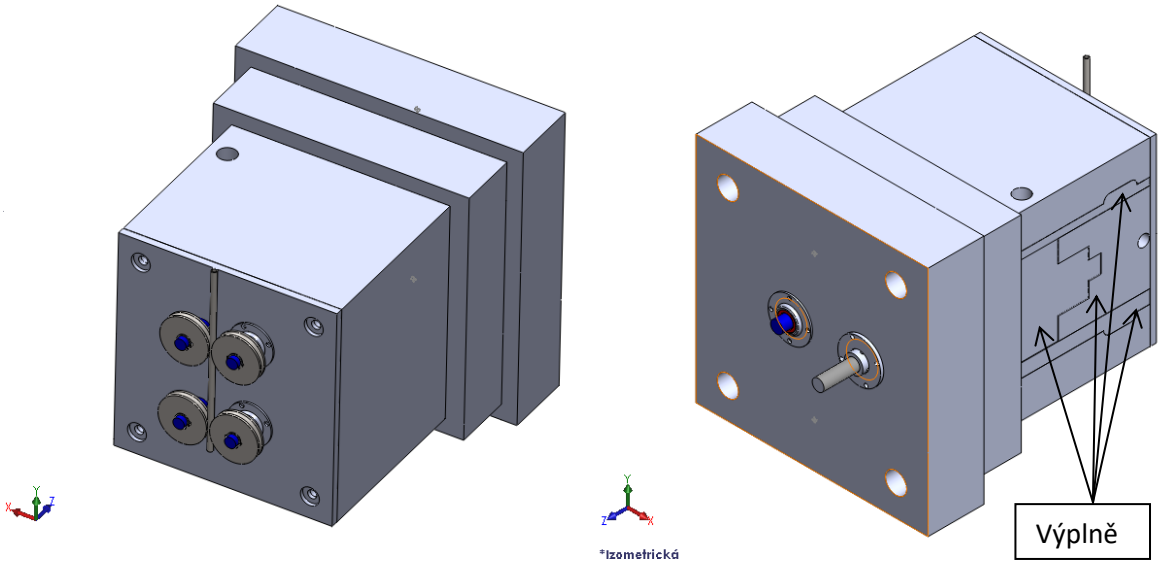
Na následujících obrázcích je celý podavač ve finálním provedení (Pozn. autora: pro lepší znázornění je skrytý spojovací materiál). Výše popsané mechanismy jsou vloženy do tzv. „vestavby“. Tato vestavby je složena z několika částí. Čtyři základní desky, a celkem čtyři části, které slouží hlavně jako výplň volného prostoru v okolí přítlačného mechanismu. Tento prostor je nutné vyplnit z důvodu odstínění radioaktivního záření, které by se skrze volný prostor šířilo snadno ven z „kničkožrouta“. Proto je veškerý volný prostor co možná nejvíce vyplněn.



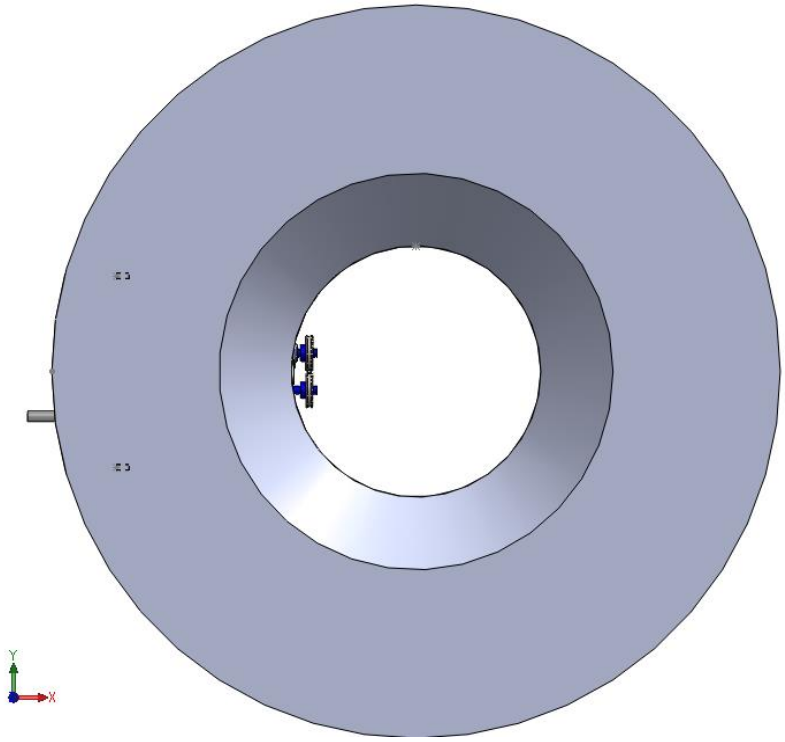
Obr. 75: Izometrický pohled na konstrukci podavače



Obr. 76: Pohled na konstrukci podavače z vnitřní strany



Obr. 77, 78: Pohled na podavač v kompletním stavu



Obr. 79: Pohled na podavač zasazený do těla „kničkožrouta“

Nyní jsou již známy veškeré rozměry konstrukce, a proto bylo provedeno výpočtové ověření namáhání hřídelí. Hřídele bez problémů vyhověly, a jelikož je tento výpočet pouze ověřující, není v práci uveden.

Co se týká výkresové dokumentace, tak byl zhotoven sestavný výkres podavače, jeden výkres podsestavy a výrobní výkres použité varianty kladek. Všechny tyto výkresy jsou k práci přiloženy.

XVIII. ZÁVĚR

Celá diplomová práce byla založena na konstruování podavače v zařízení na likvidaci čidel neutronového toku a termočlánků, který bude po dobu své činnosti pracovat na jaderné elektrárně Temelín. Jelikož se jedná o výrobu s velice malým počtem vyrobených kusů, byly použity nejlépe se hodící materiály bez ohledu na jejich cenu. Stejně tak se postupovalo i při výběru nakupovaných komponent, které jsou vždy navrženy s více než dostatečnou bezpečností.

Tento stroj je při svém provozu vystaven radioaktivnímu záření. Toto záření vychází z dopravovaných čidel, které jdou vnitřními částmi zařízení na likvidaci čidel neutronového toku a termočlánků, neboli „kničkožrouta“. Konstrukce podávacího zařízení se ve všem musela přizpůsobit tomuto faktu. Veškeré části, které mohou přijít do kontaktu s trubičkami čidel, anebo například s kapičkami kapaliny, které se na čidlech mohou vyskytovat, musí být vyrobeny z materiálu, který těmto vlivům odolá. Proto byl zde použit materiál 08Ch18N10T, tedy stejný materiál, jaký je použit na výrobu trubiček pro čidla neutronového toku i termočlánky.

Základním kamenem této práce byl správný výběr mechanismu. Byl zvolen mechanismus kladkový, a to hlavně z důvodů velice jednoduchého, tím pádem i spolehlivého, principu. Tento mechanismus je vhodný také proto, že ho lze snadno upravovat. Je možné měnit počet použitých kladek, což je velice výhodné kvůli snížení deformací dopravovaných čidel. Lze také optimalizovat tvary těchto kladek, což opět vede ke snížení deformací dopravovaných čidel. Další předností výsledného konstrukčního provedení tohoto mechanismu je velice nízká náročnost na prostor. Do vnitřního prostoru „kničkožrouta“ zasahují pouze konce hřídelí s kladkami. Nejvzdálenější konec hřídele zasahuje pouze 44 mm od vnitřní stěny podavače.

Celá konstrukce se odvíjela od základního problému – zajistit bezpečné vytahování použitých čidel. To znamená zajistit tak velké třecí síly mezi kladkami a trubičkami čidel, aby se čidla nemohla zastavit, nebo dokonce prokluzovat směrem dolů. Zkoumal se tedy třecí součinitel mezi dvěma nerezavějícími materiály, jehož určení proběhlo po rozsáhlém shánění tribologických prací s těmito materiály. Nakonec jsme dospěli k výsledku po konzultaci s vedoucím práce panem Ing. Janem Zdeborem, CSc.

Finální konstrukce podavače se skládá ze dvou základních mechanismů – mechanismus pohonu a přítlačný mechanismus. Detailní popis těchto mechanismů se nachází v předešlých kapitolách této práce viz. konec kapitoly XV. Tvar kladek byl zvolen na základě výsledků výpočtů deformační analýzy, kdy celkové hodnoty deformací byly velice příznivé, při provozu podavače téměř neznatelné. Jedná se o maximální deformace do čtyř setin milimetru.

Jak již bylo řečeno, podavač byl navrhnut s ohledem na prostředí, ve kterém bude provozován a také s ohledem na jeho spolehlivost. Proto byl stroj osazen ložisky, která

zaručují dlouhodobou schopnost provozu. ($L_h = 1{,}31 \times 10^6$ hodin, což odpovídá přibližně 150 letům provozuschopnosti). Celý podavač je také velice jednoduše rozebíratelný, tudíž by v případě jakékoli poruchy byla jeho oprava snadná a rychlá. Při jakékoli manipulaci s částmi podavače, které mohly přijít do styku s radioaktivním zářením, je nutné nejprve provést důkladnou dekontaminaci zařízení.

K této práci také patří přílohy, ve kterých je sestavný výkres podavače, jeden posdestavný výkres a výrobní výkres použitých kladek. Na CD disku jsou pak pro úplnost této práce obrázky výsledky výpočtů deformačních analýz ostatních variant a výsledky výpočtu ozubeného převodu.

Tato diplomová práce tedy přinesly velice efektivní řešení zadaného problému. Řešení splňuje zadané podmínky jako rychlost posuvu, nebo vytahování čidel silou až 2 000 N. Řešení, jehož provozuschopnost je navržena na celou dobu životnosti jaderného reaktoru.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Světová spotřeba el. energ. na člověka za rok v [GJ] [8]

Obr. 2: Schéma JE Temelín [21]

Obr. 3: Schéma primárního okruhu JE [21]

Obr. 4: Příklad řetězové štěpné reakce [22]

Obr. 5: Závislost účinného průřezu pro absorpci neutronu (σa) na energii (E). [9]

Obr. 6: Rozložení termočlánků v aktivní zóně [2]

Obr. 7: Reakce rhodia s neutronem [6]

Obr. 8. a): Konstrukce čidla neutronového toku [2]

Obr. 8. b): Detail konstrukce s naznačením rozmístění rhodiových detektorů [2]

Obr. 9: Rozložení čidel neutronového toku v aktivní zóně VVER 1000 [2]

Obr. 10: Zařízení na likvidaci čidel KNI a termočlánků pro reaktor VVER 1000 (ETE) [7]

Obr. 11: Zařízení na likvidaci čidel KNI a termočlánků pro reaktor VVER 440 (EMO) [7]

Obr. 12, 13: Trubička čidla KNI

Obr. 14: Odštěpek KNI čidla i s vodiči uvnitř

Obr. 15: Termočlánky [7]

Obr. 16: Kladky

Obr. 17, 18: Rotační tyčky

Obr. 19: Posuvný mechanismus

Obr. 20: Výpočtové schéma kladkového mechanismu a působících sil

Obr. 21: Graf ze zkoušky tahem trubičky KNI

Obr. 22: Odstupňovaný hřídel

Obr. 23: První varianta podávacího zařízení

Obr. 24: První varianta podávacího zařízení v celém „Kničkožřoutivi“

Obr. 25, 26: Pohledy na druhou variantu podávacího zařízení

Obr. 27: Funkční schéma druhé varianty podavače

Obr 28: Druhá varianta podavače zasazena do těla „Kničkožrouta“

Obr. 29, 30, 31: Znázornění ozubených kol a jejich parametrů

Obr. 32, 33, 34: Znázornění ozubených kol a jejich parametrů

Obr. 35, 36, 37, 38: Znázornění sil působících v ozubení

Obr. 39: Náčrt výsledného mechanismu

Obr. 40: Náčrt mechanismu pohonu zařízení

Obr. 41: Schéma přítlačného mechanismu

Obr. 42: Výsledné mechanismy podavače

Obr. 43: Výsledné mechanismy podavače axonometrický pohled

Obr. 44: Výpočtový model, schéma shodné pro všechny varianty

Obr. 45: Okrajové podmínky výpočtu

Obr. 46: Síť metody konečných prvků

Obr. 47: Detail sítě MKP v místě styku kladek a trubičky

Obr. 48, 49: Tvar a rozměry kladek varianty 1

Obr. 50, 51: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

Obr. 52, 53: Tvar a rozměry kladek varianty 2

Obr. 54, 55: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

Obr. 56, 57: Tvar a rozměry kladek varianty 3

Obr. 58: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

Obr. 59, 60: Tvar a rozměry kladek varianty 4

Obr. 61, 62: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

Obr. 63, 64: Tvar a rozměry kladek varianty 5

Obr. 65, 66: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

Obr. 67, 68: Tvar a rozměry kladek varianty 6

Obr. 69: Sevření trubiček čidla KNI a termočlánku

Obr. 70: Celkový pohled na model po výpočtech deformační analýzy

Obr. 71: Řez v oblasti styku kladek s trubičkou

Obr. 72, 73: Detailní pohled na deformace v trubičče čidla KNI a na posuvy v téže trubičce

Obr. 74: Zvolená geometrie použitých kladek

Obr. 75: Izometrický pohled na konstrukci podavače

Obr. 76: Pohled na konstrukci podavače z vnitřní strany

Obr. 77, 78: Pohled na podavač v kompletním stavu

Obr. 79: Pohled na podavač zasazený do těla „kničkožrouta“

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Výhřevnost různých materiálů. [23]

Tab. 2: Chemické složení konstrukčního materiálu trubiček „KNIček“ a termočlánků. [11]

Tab. 3: Materiálové vlastnosti konstrukčního materiálu „KNIček“ a termočlánků.[12]

Tab. 4: SWOT analýza

Tab. 5: Značení oceli dle různých norem [19]

Tab. 6: Doprovodné materiálové konstanty [19,20]

Tab. 7: Vypočtené parametry ozubení

Tab. 8: Materiálové konstanty ozubených kol

Tab. 9: Výsledky výpočtů deformačních analýz

ZDROJE

Tištěné zdroje:

[1] BEČVÁŘ, Josef a kolektiv. *Jaderné elektrárny*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977

[2] ZDEBOR, Jan. *Prezentace k výuce KKE/JEP*

[3] HOSNEDL, Stanislav, KRÁTKÝ, Jaroslav. *Příručka stojního inženýra, Obecné strojní části 1.* 1. vyd. Praha: Vydavatelství a nakladatelství Computer Press, 1999

[4] HOSNEDL, Stanislav, KRÁTKÝ, Jaroslav. *Příručka stojního inženýra, Obecné strojní části 2.* 1. vyd. Praha: Vydavatelství a nakladatelství Computer Press, 2000

[5] HEZOUČKÝ, František, ŠTĚCH, Svatobor. *Základní teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními reaktory.* Plzeň: Vydala Západočeská Univertiza v Plzni, 2015

[6] BLÁHA, Václav. *DETEKTORY, sborník přednášek ze semináře.* Týn nad Vltavou: Tisk: Tisková agentura Vltavín, duben 2000

Elektronické zdroje:

[7] ŠKODA JS a.s. ZAŘÍZENÍ PRO LIKVIDACI ČIDEL VNITROREAKTOROVÉHO MĚŘENÍ. [online]. [Citace: 1. 3. 2017] Dostupné z: <http://www.skoda-js.cz/cs/vyrobky-a-sluzby/zarizeni-pro-jaderne-elektrarny-typu-vver-a-rbmk/>

[8] TVERBERG, Gail. World Energy Consumption Since 1820 in Charts [online]. [Citace: 9. 10. 2016], Dostupné z: <https://ourfiniteworld.com/2012/03/12/world-energy-consumption-since-1820-in-charts/>

[9] MOTYČKA, Vojtěch, ČERMÁK, Martin. *Mikroskopický účinný průřez*. [online]. [Citace: 8. 11. 2016]. Dostupné z: <: http://jaderneinfo.webnode.cz/news/mikroskopicky-ucinny-prurez/http://jaderneinfo.webnode.cz/news/mikroskopicky-ucinny-prurez/>

[10] KRATINA, Jakub. *HUSTOTA MATERIÁLŮ.* [online]. [Citace: 15. 4. 2017] Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hustota-materialu-a-latek>

[11] SLOVACA, Ceha. *Konstrukční oceli pro práci za zvýšených teplot.* [online]. [Citace: 15. 4. 2017] Dostupné z: <http://www.scritub.com/limba/ceha-slovaca/Konstrukn-oceli-pro-prci-za-zv74444.php>

[12] ALFUN. *Korozivzdorná ocel – nerez*. [online]. [Citace: 16. 4. 2017] Dostupné z: <http://www.alfun.cz/korozivzdorna-ocel-nerez>

[13] KOENIGFRANGSTAHL. *Ekvivalenty ocelí*. [online]. [Citace: 16. 4. 2017] Dostupné z: <http://www.koenigfrankstahl.sk/produkty/nerez/>

[14] ŠČERBOVÁ, M., PAVELKA, V., NAMÁHÁNÍ NA KRUT. [online]. [Citace: 3. 5. 2017] Dostupné z: <http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/MEC/14_MEC_NAMAHANI_NA_KRUT_2_ROCNIK-UT.pdf>

[15] E-KONSTRUKTÉR. *HODNOTY MEZÍ PEVNOSTI, KLUZU, ÚNAVY A DOVOLENÝCH NAPĚTÍ PRO OCEL*. [online]. [Citace: 20. 4. 2017] Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hodnoty-mezi-pevnosti-kluzu-unavy-a-dovolenych-napeti-pro-ocel>

[16] FEVOS s.r.o., *Tlačné pružiny ČSN 026020*. [online]. [Citace: 15. 5. 2017] Dostupné z: <http://www.pruziny-fevos.cz/Tlacnepruz.pdf>

[17] OMRON Industrial Automation. *Katalogové listy produktů servo pohonů.* [online]. [Citace: 18. 5. 2017] Dostupné z: <http://www.omron.com.au/products/family/2627/specification.html>

[24] SKF, *Katalogové listy ložisek.* [online]. [Citace: 4. 5. 2017] Dostupné z: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/single-row-angular-contact-ball-bearings/single-row/index.html?designation=7302%20BE-2RZP&unit=metricUnit>

Publikace na Internetu:

[18] ČESKÝ ROZHLAS. *Vědci představili diamantové baterie jako nový způsob využití jaderného odpadu*. [online]. [Citace: 12. 2. 2017] Dostupné z: <http://www.rozhlas.cz/radiowave/wavenews/_zprava/vedci-predstavili-diamantove-baterie-jako-novy-zpusob-vyuziti-jaderneho-odpadu--1676103>

[1*] VRBKA, Martin, VAVERKA, Michal. *Metoda konečných prvků.* [online]. [Citace: 12. 6. 2016] Dostupné z: < http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf > Brno: VUT, FME, UK

[20] ČESKOSLOVENSKÁ STÁTNÍ NORMA. *ČSN 41 7247.* [online]. [Citace: 1. 4. 2017] Dostupné z: <http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled_normy.php?norma=417247-csn-41-7247&kat=3461>

Zdroje obrázků:

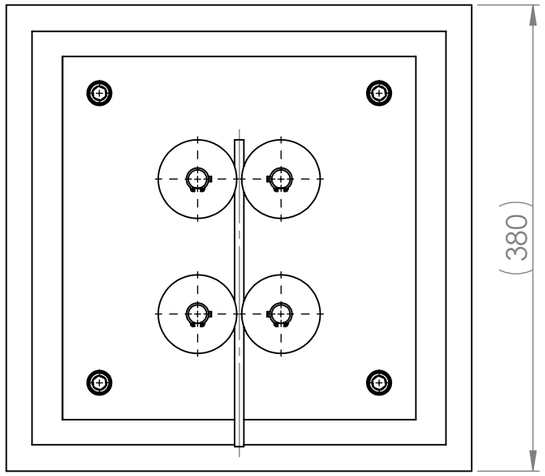
[8] TVERBERG, Gail. World Energy Consumption Since 1820 in Charts [online]. [Citace: 9. 10. 2016], Dostupné z: <https://ourfiniteworld.com/2012/03/12/world-energy-consumption-since-1820-in-charts/>

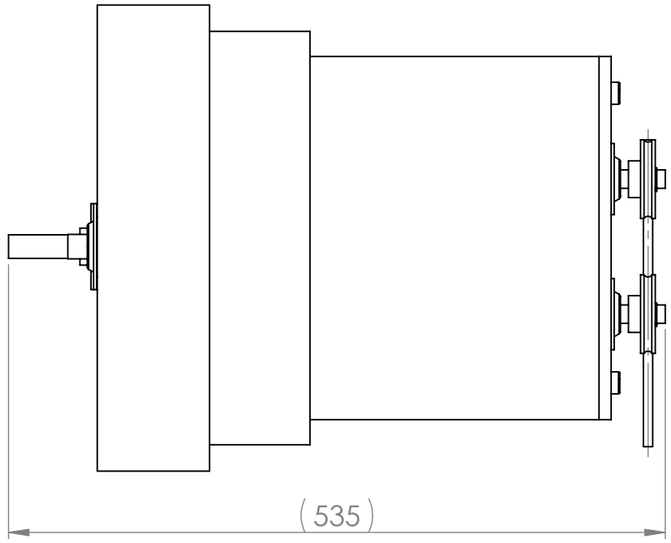
[21] Temelín: na vlastní oči. In: Fakulta informatiky Masarykovy univerzity [online]. [cit. 28. 9. 2016]. Dostupné z: <http://www.fi.muni.cz/~tomp/envi/eseje/polacek/schema.gif>

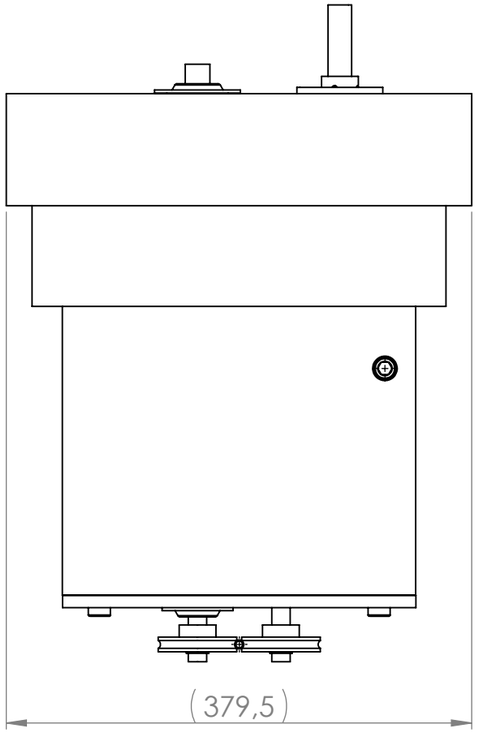
[22] ENERGY WEB, *JADERNÁ REAKCE*. [online]. [Citace: 11. 11. 2016] Dostupné z: <http://www.energyweb.cz/web/EE/images/03/31_03.gif>

Zdroje tabulek:

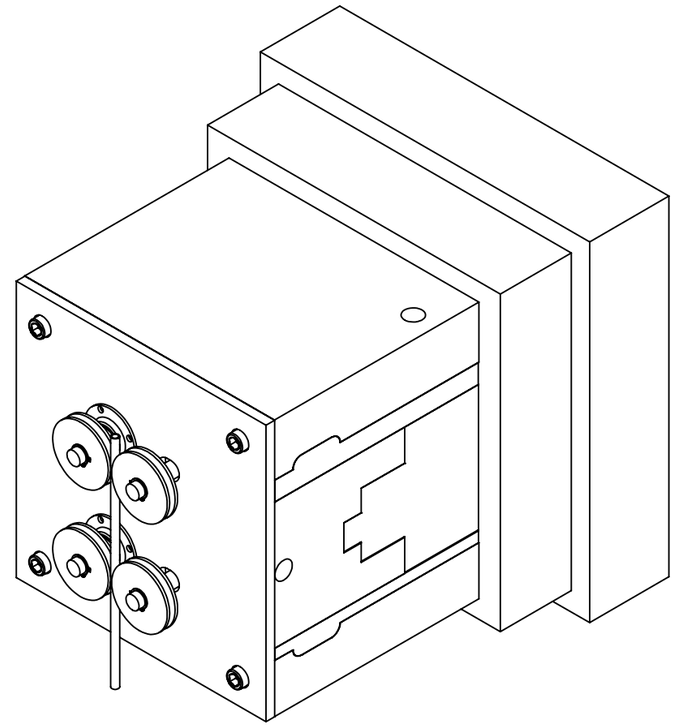
[23] ČEZ a.s., *1 JADERNÁ TABLETKA = 880 KG UHLÍ*. [online]. [Citace: 21. 10. 2016] Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/tableta_6.html>



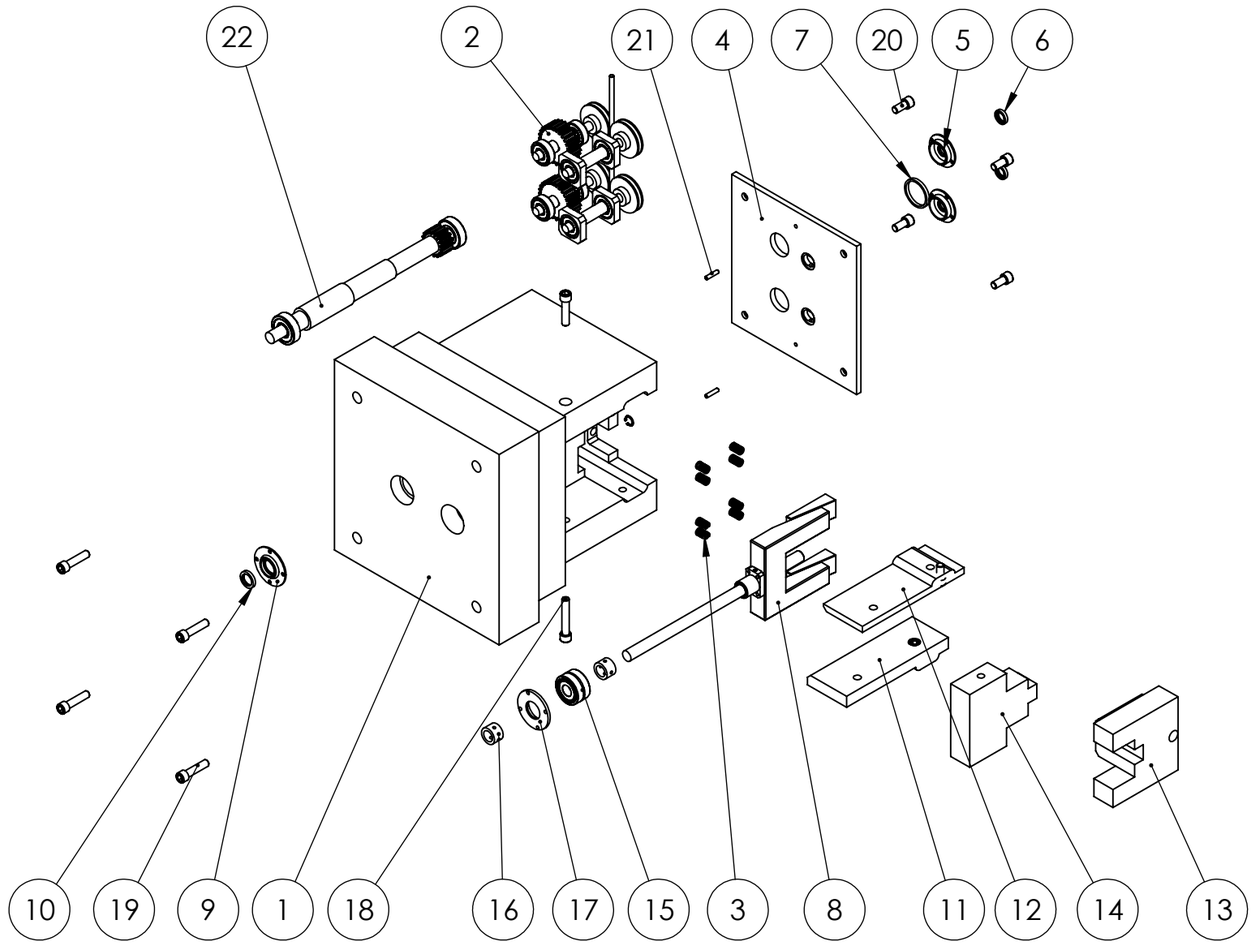




AXONOMETRICKÝ POHLED

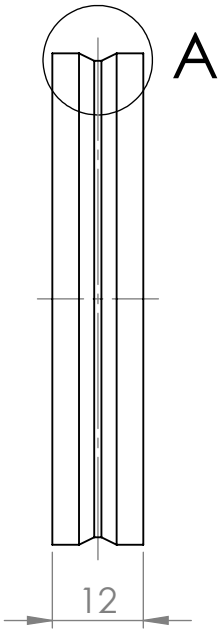


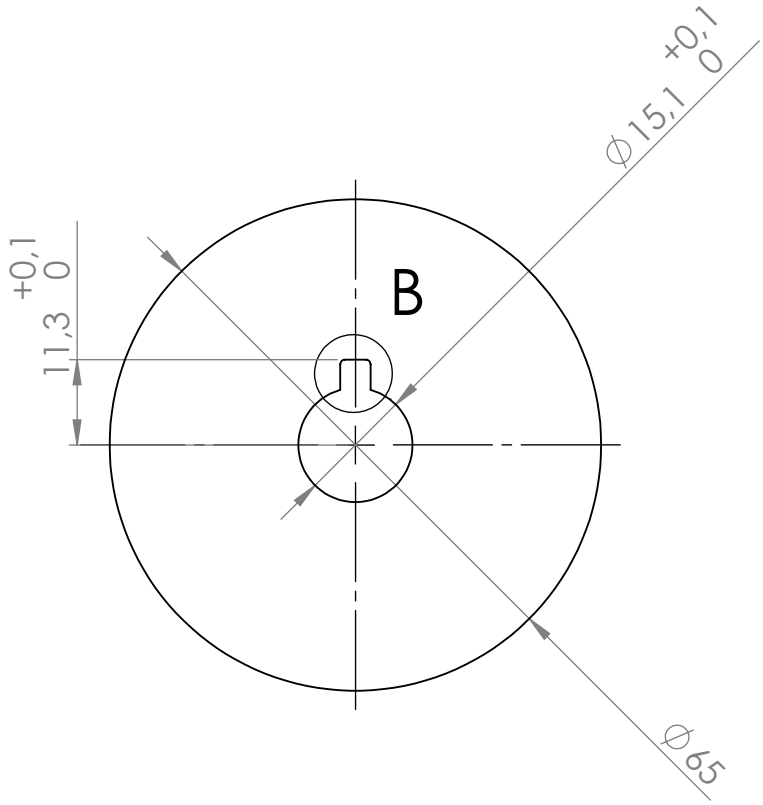
Západočeská univerzita v Plzni		OPRACOVÁNÍ:			ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	MĚŘÍTKO VÝKRESU 1:10	ZMĚNA
	JMÉNO	PODPIS	DATUM			NÁZEV:	
NAVRHL	Hrych		29.5.2017			Podávací zařízení	
PŘEZKOUŠEL							
SCHVÁLIL							
VÝROBA							
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:		Č. VÝKRESU: DP_Lukáš Hrych	A3
				HMOTNOST: 350 kg		MĚŘÍTKO:1:10	LIST 1 Z 1 LISTŮ

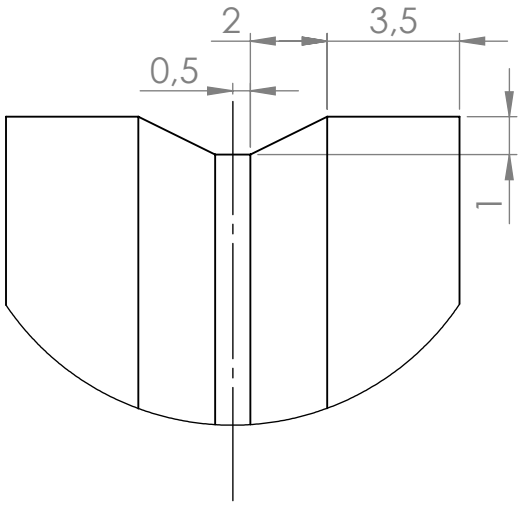


Č. POLOŽKY	Č. DÍLU	POPIS	Rozstřel/MNOŽ.
1	Vestavba		1
2	Podávací mechanismus	Podav. mech. 001	1
3	Pružinka		8
4	Vnitřní vestavba		1
5	Uchycení ložisek 2		2
6	Gufero male		2
7	Podložka k ložisku		1
8	Přítlačný mechanismus		1
9	Uchycení ložisek		1
10	Gufero velke		1
11	Výstelka_001		1
12	Výstelka_002		1
13	Výstelka_003		1
14	Výstelka_004		1
15	AX.Ložisko	BEAS 020052-2RS	1
16	Uchyceli Ax. lož. 2		2
17	Uchyceli Ax. lož.		1
18	12×70_ŠROUB	ČSN 021143	1
19	12×50_ŠROUB	ČSN 021143	9
20	12×25_ŠROUB	ČSN 021143	7
21	ČEP 6×18 A	ISO 2340	6
22	Pohon		1

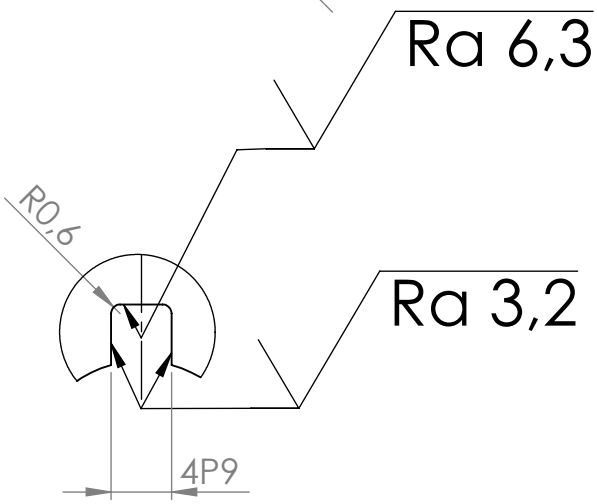
Západočeská univerzita v Plzni		OPRACOVÁNÍ:			ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	MĚŘÍTKO VÝKRESU 1:10	ZMĚNA
	JMÉNO	PODPIS	DATUM			NÁZEV: Podávací zařízení	
NAVRHL	Hrych		29.5.2017				
PŘEZKOUŠEL							
SCHVÁLIL							
VÝROBA							
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:		Č. VÝKRESU: DP_Lukáš Hrych	A3
				HMOTNOST: 350 kg		MĚŘÍTKO:1:10	LIST 2 Z 1 LISTŮ





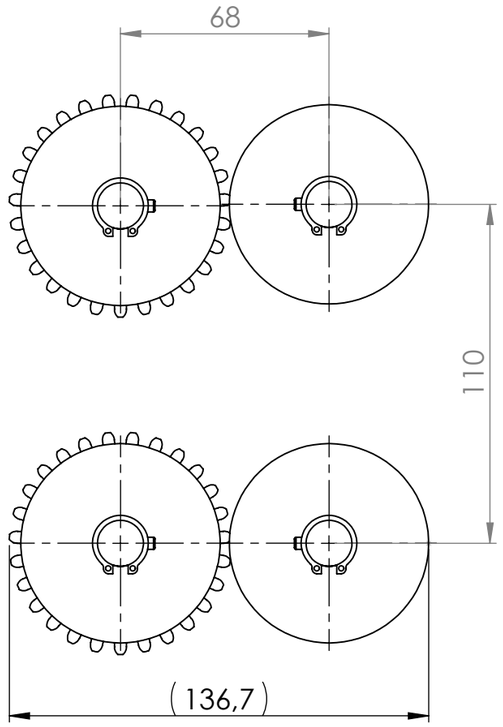


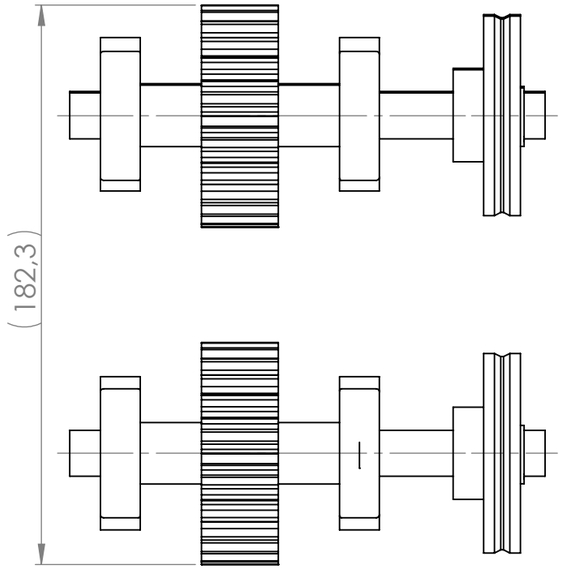
DETAIL A
MĚŘÍTKO 5 : 1



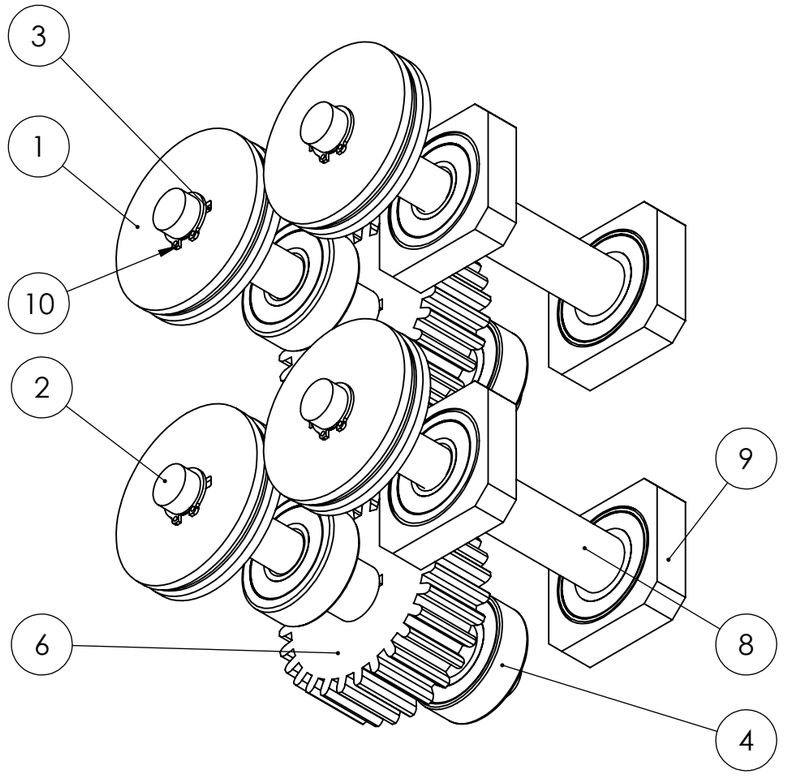
DETAIL B
MĚŘÍTKO 2 : 1

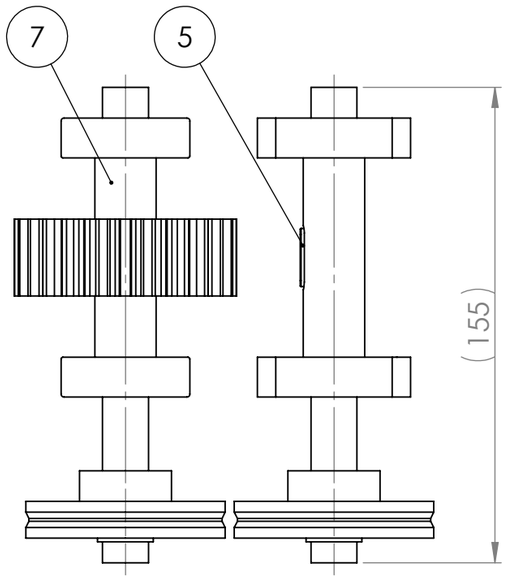
Západočeská univerzita v Plzni POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: TOLERANCE: ISO 8015 PŘESNOST: ISO 2768		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	MĚŘÍTKO VÝKRESU: 1:1	ZMĚNA
	NÁZEV	PODPIS	DATUM		NÁZEV:	
NAVRHL	Hrych		29.5.2017		Kladka	
PŘEZKOUŠEL						
SCHVÁLIL						
VÝROBA						
Z. JAKOSTI				MATERIÁL: 08Ch18N10T	Č. VÝKRESU Kladka_005	A4
				HMOTNOST: 0,24 kg	MĚŘÍTKO:1:1	LIST 1 Z 1 LISTŮ





Č. POLOŽKY	Č. DÍLU	POPIS	Množství
1	Kladka 005		1
2	Hřídel		4
3	Pero 10×4×9,5		4
4	Ložisko	7302 BE-2RZP	8
5	Pero 15×5×9,5		4
6	Ozubené kolo		2
7	Rozpěrka		4
8	Rozpěrka 2		2
9	Domek_na_ložisko		4
10	Poj. Kroužek.16	ČSN 02 2930	4





Západočeská univerzita v Plzni		OPRACOVÁNÍ:			ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	MĚŘÍTKO VÝKRESU 1:5	ZMĚNA
	JMÉNO	PODPIS	DATUM			NÁZEV:	
NAVRHL	Hrych		29.5.2017			Podavač	
PŘEZKOUŠEL							
SCHVÁLIL							
VÝROBA							
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:		Č. VÝKRESU Podav. mech. 001	A3
				HMOTNOST: 5 kg		MĚŘÍTKO:1:5	LIST 1 Z 1 LISTŮ