VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁVRH INSPEKČNÍHO SLOUPU PRO KONTROLY STAVU POUŽITÉHO JADERNÉHO PALIVA

DESIGN OF EQUIPMENT OF SPENT NUCLEAR FUEL ASSEMBLIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Ondřej Šimek
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Jitka Vojáčková
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Ondřej Šimek ***ID:*** 164417
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh inspekčního sloupu pro kontroly stavu použitého jaderného paliva

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis mostu zařízení N-SIO, palivového souboru, záchytu a ukládací mříže v bazénu paliv
2. Rešerše zaměřená na nalezení možných způsobů měření rozměrů palivového souboru
3. Popis a návrh měření pomocí LVDT čidel
4. Konstrukční návrh inspekčního sloupu s použitím principu měření pomocí LVDT čidel
5. Základní pevnostní výpočet zařízení (či jeho vybraných dílů) pro jednotlivé provozní stavy
6. Výkres sestavy a vybraných konstrukčních dílů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018 ***Termín odevzdání:*** 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jitka Vojáčková
Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE

ŠIMEK, O. Návrh inspekčního sloupu pro kontroly stavu použitého jaderného paliva. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2018, 105 stran.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Jitce Vojáčková, vedoucí mé diplomové práce, za odborné konzultace a pomoc při řešení organizačních věcí, které se týkaly této diplomové práce. Dále chci poděkovat Ing. Davidu Bukvářovi a Ing. Václavu Benešovi za odborné konzultace a spolupráci při řešení jednotlivých situací, problémů a technických skutečností, které se přímo dotýkaly návrhu zařízení, jež je hlavním tématem této diplomové práce. V neposlední řadě bych velmi rád poděkoval Ing. Miloslavu Ruchařovi za odborné konzultace a poskytnutí možnosti spolupracovat na tomto projektu se společností ŠKODA JS a.s.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh inspekčního sloupu pro kontroly stavu použitého jaderného paliva“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové/bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: …… …….

ABSTRAKT

Cílem této práce je návrh specifického zařízení pro firmu ŠKODA JS a.s., které je součástí pevnostní analýzy nového stendu inspekcí (N-SIO). Tímto zařízením je inspekční sloup, díky němuž je možné provádět inspekci vyhořelých palivových souborů v provozu jaderné elektrárny Temelín. Tato diplomová práce je dále souhrnem celého návrhu inspekčního sloupu a popisu jednotlivých inspekčních komponent a zařízení. Součástí práce jsou také základní pevnostní analýzy a výkres hlavní sestavy nového stendu inspekcí.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Palivový soubor, bazén vyhořelého paliva, nový stend inspekcí (N-SIO), inspekční sloup, inspekční blok, LVDT senzor, manipulační most, záchyt PS, měřicí tank, zkrut PS, ohyb PS, růst PS.

ABSTRACT

The diploma thesis aim to the design of equipment for ŠKODA JS a.s., which is part of a new inspection stand (N-SIO). This equipment is an inspection column that provides the possibility to inspect spent fuel assemblies at the operation of the Temelín nuclear power plant. This master thesis is also a summary of the whole design of the new inspection stand and a description of the individual inspection components and devices. One of the parts of the thesis is also a basic strength analysis and a drawing of the main assembly of inspection equipment.

KEY WORDS:

Fuel Assembly, spent fuel pool, new inspection stand, (N-SIO), inspection equipment, inspection block, LVDT sensor, handling bridge, FA capture, measuring carriage, FA twist, FA bend, FA grow.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ **8**

SEZNAM TABULEK **11**

SEZNAM ZKRATEK **12**

SEZNAM SYMBOLŮ **13**

ÚVOD **14**

1 JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN **15**

1.1 PALIVOVÝ SOUBOR **16**

1.2 BAZÉN VYHOŘELÉHO PALIVA **17**

1.3 NOVÝ STEND INSPEKCÍ **18**

2 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY A POPIS ZAŘÍZENÍ **19**

2.1 PODMÍNKY PRO SI URČENÉ PROSTŘEDÍM **20**

2.1.1 PODMÍNKY OKOLÍ 20

2.1.2 CHEMICKÉ LÁTKY ZAKÁZANÉ V PRIMÁRNÍM OKRUHU 21

3 ZPŮSOB KONTROLY PALIVOVÉHO SOUBORU **23**

3.1 MOŽNOSTI MĚŘENÍ **24**

3.1.1 MĚŘENÍ POMOCÍ LVDT SOND 24

3.1.2 MĚŘENÍ POMOCÍ UZ SOND 26

3.1.3 MĚŘENÍ POMOCÍ 3D LASEROVÉ TRIANGULACE 28

4 KONSTRUKČNÍ NÁVRH INSPEKČNÍHO SLOUPU **30**

4.1 MANIPULAČNÍ MOST **30**

4.2 MŘÍŽ BAZÉNU S5 ..... **32**

4.3 ZÁCHYT PS **34**

4.4 NOSNÝ SPOJOVACÍ KORIDOR (NSK) **35**

4.5 INSPEKČNÍ BLOK **36**

4.5.1 KLEC IB 39

4.6 ARETACE (VEDENÍ) ZÁCHYTU PS **41**

4.6.1 ARETACE (VEDENÍ) ZÁCHYTU PS PŘI MANIPULACI 41

4.6.2 ARETACE (VEDENÍ) ZÁCHYTU PS A PS PŘI INSPEKCI 45

5 NÁVRH A KONSTRUKCE INSPEKČNÍCH PRVKŮ **48**

5.1 MĚŘICÍ SYSTÉMY A MECHANISMY **48**

5.1.1 LVDT SENZOR LIPS 115 48

5.1.2 LVDT SENZOR AML/IE 49

5.1.3 PŘEVODNÍK SIGNÁLU LVDT/AD 52

5.1.4 VSTUPNÍ TERMINÁL 54

5.1.5 ALTERNATIVNÍ VYHODNOCENÍ SIGNÁLU 56

5.1.6 MĚŘICÍ TANK 56

5.1.7 MECHANISMUS PRO URČENÍ RŮSTU PS 63

5.1.8 VÝPOČET CELKOVÉ VÝŠKY PS 66

5.1.9 TEPLOTNÍ SNÍMAČE FIEDLER 67

5.1.10 FIEDLER PT100-XM 67
5.1.11 MĚŘICÍ PŘEVODNÍK TEP06 69
5.1.12 FIEDLER TEP1/H 71
5.2 KAMEROVÝ SYSTÉM 74
5.2.1 INSPEKČNÍ KAMERA VT XLRAD PT 74
5.2.2 INSPEKČNÍ KAMERA IST-REES R981/C981 77
5.3 OSVĚTLOVACÍ SYSTÉM 83
6 PEVNOSTNÍ ANALÝZY 84
6.1 PEVNOSTNÍ VÝPOČTY VYBRANÝCH SPOJŮ 84
6.2 DEFORMAČNÍ ANALÝZY 94
7 ZÁVĚR 98
POUŽITÁ LITERATURA 100
SEZNAM PŘÍLOH 103

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Sestava reaktoru VVER-1000 [14] *16*
Obrázek 2 - Palivový soubor TVSA-T *16*
Obrázek 3 - Hlavní části PS v pořadí (Dolní část, Horní část a Distanční mřížka) *16*
Obrázek 4 - Dispozice bazénu s vyhořelým palivem v reaktorovém sálu *17*
Obrázek 5 - Předběžné návrhové schéma zařízení N-SIO [11] *18*
Obrázek 6 - Schéma bazénu B2 s naznačeným vymezeným prostorem [11] *19*
Obrázek 7 - Grafická závislost radiačního zatížení v okolí PS [3] *21*
Obrázek 8 - Deformace PS *23*
Obrázek 9- Schématické znázornění LVDT [15] *25*
Obrázek 10 - LVDT sonda [8] *26*
Obrázek 11 – Defektoskop UD9812 [6] *27*
Obrázek 12 - UZ sonda [9] *27*
Obrázek 13 - Blokové schéma zapojení UZ systému pro měření PS [11] *28*
Obrázek 14- Princip měření pomocí 3D laserové triangulace[2] *29*
Obrázek 15 - Dispozice manipulačního mostu s veškerým vybavením [11] *31*
Obrázek 16 - Naváděcí kolíky pro snažíš zasunutí vyhořelého PS do absorpční části [11] *32*
Obrázek 17 - Dispozice mříže bazénu S5 [11] *33*
Obrázek 18 – Princip záchytu PS [11] *34*
Obrázek 19 - Záchyt PS (vlevo - původní, vpravo - upravený) *35*
Obrázek 20 - Nosný spojovací koridor s hlavní spojovací přírubou MM *36*
Obrázek 21 - Podložka Nord-lock [27] *39*
Obrázek 22 - Nosná klec inspekčního bloku *39*
Obrázek 23 - Rozložení pater Klece IB po výšce *40*
Obrázek 24 - Aretační blok pro vedení záchytu PS při manipulacích *41*
Obrázek 25 - Nejširší místo PS (1 - průměr záchytu PS, 2 - nejširší místo PS) *42*
Obrázek 26 - Aretační blok pro vedení záchytu PS při manipulacích *43*
Obrázek 27 - Záchyt PS v aretačních blocích *44*
Obrázek 28 - Aretační příruba v horní části IB *45*
Obrázek 29 - Pneumatický píst P1S_D 080 x – 0025 [30] *46*
Obrázek 30 – Aretační mechanismus ve spodní části I *47*
Obrázek 31 - Lineární snímač polohy LIPS P115 [12] *49*
Obrázek 32 - LVDT senzor zakončený měřící tyčinkou [16] *50*

Obrázek 33 - LVDT senzor zakončený okem z obou stran [16] *50*
Obrázek 34 - LVDT senzor zakončený kuličkou [16] *50*
Obrázek 35 - Základní rozměrové parametry LVDT senzoru [16] *51*
Obrázek 36 - Převodník signálu LVDT/AD [34] *53*
Obrázek 37 - Rozměry skříně převodníku LVDT/AD [34] *54*
Obrázek 38 – Analogová napěťová karta EL3104 [32] *55*
Obrázek 39 - Měřící tank 1 ..... *56*
Obrázek 40 - Měřicí tank 2 ..... *57*
Obrázek 41 - Měřicí tank (1 - Přední doraz, 2 - Zadní doraz) *58*
Obrázek 42 - Posuvná plocha od společnosti IGUS s kluznými pouzdry Iglidur-X [22] *58*
Obrázek 43 - Jednočinný odpružený pneumatický pohon P1S 025 S S 0025 [30] *59*
Obrázek 44 - Schematická značka škrticího ventilu vzduchu [23] *61*
Obrázek 45 - Škrticí ventil V53 [23] *61*
Obrázek 46 - Měřicí tank pro určení zkrutu PS *63*
Obrázek 47 - Mechanismus pro určení růstu PS *64*
Obrázek 48 - Rotační indukční snímač úhlu POSITEK S520 [31] *64*
Obrázek 49 - Schematické vyznačení rozměrů pro dopočet skutečné výšky PS *66*
Obrázek 50 - Grafické znázornění pro přepočet měřeného úhlu na vzdálenost *67*
Obrázek 51 - Odporový teplotní snímač Pt100-XM [19] *68*
Obrázek 52 - Zapojení přívodního kabelu k senzoru [19] *68*
Obrázek 53 - Převodník TEP06 pro odporové teplotní senzory Pt100-XM [20] *69*
Obrázek 54 - Ponorný snímač teploty s odporovým čidlem TEP1/H [21] *71*
Obrázek 55 - Profilové znázornění a základní rozměry TEP1/H [21] *72*
Obrázek 56 - Zapojení PUR kabelu převodníku s čidlem TEP1/H [21] *73*
Obrázek 57 - Upevnění a držení teplotního senzoru Pt100-XM *74*
Obrázek 58 - Iradiační kamera XLRAD s LED diodami [18] *75*
Obrázek 59 - Příslušenství kamerového systému XLARD [18] *77*
Obrázek 60 - Iradiační kamera IST-REES [17] *77*
Obrázek 61 – Umístění kamerového systému na IB *80*
Obrázek 62 - Kruhová kluzná kolejnice s domkem. [35] *81*
Obrázek 63 - Pneumatický motor PARKER P1V-S020 [36] *81*
Obrázek 64 - Umístění krytu na mechanismu pro držení a manipulaci kamer na IB *82*
Obrázek 65 - Jednotlivé hlavní části mechanismu I *82*
Obrázek 66 - Jednotlivé hlavní části mechanismu II *83*

Obrázek 67 - Přehled umístění spojů v horní části inspekčního sloupu *85*
Obrázek 68 - Přehled umístění spojů na inspekčním bloku *91*
Obrázek 69 – Grafická závislost krouticího momentu na napětí ve sledovaných místech IB *95*
Obrázek 70 - Napětí v horních tyčích při zvoleném krouticím momentu *95*
Obrázek 71 – Zjištění krouticího momentu pro smluvní mez kluzu *96*
Obrázek 72 - Namáhání sloupku díky odporu prostředí při jeho pohybu v prostorách bazénu *97*

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Parametry a informace o reaktoru VVER-1000 [14] *15*
Tabulka 2 - Radiační zatížení v okolí PS [3] *21*
Tabulka 3 - Přehled zakázaných a podmíněně dovolených prvků [3] *22*
Tabulka 4 - Parametry UZ sond *27*
Tabulka 5 - Popis Obrázku 15 ..... *31*
Tabulka 6 - Parametry palivové mříže [11] *33*
Tabulka 7 - Základní vlastnosti pístu P1S_D 080 x – 0025 [30] *47*
Tabulka 8 – Parametry snímače LIPS P115 [12] *49*
Tabulka 9 - Volitelné rozměry u výrobce senzorů AML/IE [16] *51*
Tabulka 10 - Materiálové vlastnosti [16] *52*
Tabulka 11 - Parametry převodníku [34] *54*
Tabulka 12 - Parametry vstupní analogové karty EL3104 [32] *55*
Tabulka 13 – Funkční provedení pneumatických pístů (žlutě označený je výše vybraný) [30] *60*
Tabulka 14 - Základní technické a materiálové vlastnosti [30] *60*
Tabulka 15 - Základní parametry škrticího ventilu V53 [23] *62*
Tabulka 16 - Technické základní parametry senzoru S520 [31] *65*
Tabulka 17 - Technické parametry odporového teplotního čidla Pt100-XM [19] *69*
Tabulka 18 - Parametry měřícího převodníku TEP06 [20] *71*
Tabulka 19 - Technické parametry převodníku teploty s čidlem TEP1/H [21] *72*
Tabulka 20 - Cenový rozdíl v obou variantách teplotních čidel pro IB *73*
Tabulka 21 - Parametry a popis kamerového systému VT XLRAD PT [18] *76*
Tabulka 22 – Parametry a popis kamerového systému IST-REES [17] *78*
Tabulka 23 - základní vlastnosti pneumatického motoru PARKER [36] *81*
Tabulka 24 - Vypočtené hodnoty pro první tři přírubové spoje (volba průměru šroubů) *88*
Tabulka 25 - Vypočtené hodnoty pro první tři přírubové spoje (výpočet utahovacího momentu) *88*
Tabulka 26 - Vypočtené hodnoty pro spoje IB (první část) *92*
Tabulka 27 - Vypočtené hodnoty pro spoje IB (druhá část) *92*
Tabulka 28 - Tabulka hodnot odečtených při kroutícím namáhání ve spodní části IB *94*

SEZNAM ZKRATEK

AC	Střídavý
AZ	Aktivní zóna
BAAP	Budova aktivních pomocných provozů
BWR	Boiling water reactor
DC	Stejnosměrný
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
IB	Inspekční blok
JE	Jaderná elektrárna
KSO	Koš stendu oprav
LVDT	Linear variable differential transformer
MM	Manipulační most
M-SIO	Mobilní stend inspekcí a oprav
N-SIO	Nový stend inspekcí
PS	Palivový soubor
PWR	Pressure water reactor
S5	Bazén vyhořelého paliva – sekce 5
SI	Stend inspekcí, Inspekční sloup
UZ	Ultrazvuk
VVER	Energetický reaktor moderovaný a chlazený lehkou vodou
WWER	Water water energy reactor

SEZNAM SYMBOLŮ

l	Celková výška palivového souboru (PS)	(mm)
l_2	Výška břemene spolu se záchytem PS	(mm)
l_1	Vzdálenost osy senzoru od dosedací horní plochy	(mm)
l_z	Výška záchytu PS	(mm)
l_r	Délka měřicího ramene	(mm)
d_{lz}	Výška zapuštění PS v záchytu PS	(mm)
d_l	Vzdálenost osy senzoru od dotykového výložníku	(mm)
T	Úhel natočení měřicího ramene dotykového výložníku	(°)
S_p	Zkušební napětí	(MPa)
S_d	Průřez dříku šroubu	(mm^2)
A_s	Výpočtový průřez šroubu	(mm^2)
R_m	Minimální pevnost v tahu	(MPa)
R_e	Minimální smluvní mez kluzu	(MPa)
F_i	Síla předpětí	(N)
F_s	Provozní síla	(N)
σ_i	Napětí od síly předpětí	(MPa)
σ_d	Napětí ve šroubu v provozním stavu	(MPa)
σ_{d2}	Napětí ve šroubu v provozním stavu při předpětí	(MPa)
k_p	Tuhost spojovaných součástí	($kN \cdot mm^{-1}$)
k	Koeficient bezpečnosti	(-)
k_2	Koeficient bezpečnosti při předpětí	(-)
k_s	Tuhost šroubu	($kN \cdot mm^{-1}$)
K	Součinitel utahovacího momentu	(-)
E	Modul pružnosti	(GPa)
l_b	Délka části šroubu se závitem	(mm)
l_g	Délka válcové části dříku bez závitu	(mm)
l_s	Svěrná délka	(mm)
g	Gravitační zrychlení	($m \cdot s^{-2}$)
m	Hmotnost	(kg)
i	Počet šroubů	(-)
C	Část provozní síly přenášené šroubem	(-)
M_i	Moment potřebný pro vyvolání předpětí	(N·m)
d	Metrický průměr šroubu	(mm^2)
d_m	Malý průměr šroubu	(mm^2)
k_x	Nový koeficient bezpečnosti pro vybraný šroub	(-)
F	Síla působící na těleso	(N)
ρ	Hustota prostředí	($kg \cdot m^{-3}$)
v	Rychlost	($m \cdot s^{-1}$)
S	Plocha tělesa	(m^2)

ÚVOD

Jaderná energie je v současné době stále velmi důležitým zdrojem elektrické energie. Na území České Republiky, se tímto způsobem energie získává ve dvou elektrárnách. První z nich je elektrárna Dukovany. Dukovany jsou elektrárnou se čtyřmi jadernými reaktory typu VVER-440/V213. První ze čtyř reaktorových bloků byl spuštěn v roce 1985 a v současné době je elektrárna stále stabilním zdrojem energie o celkovém výkonu 2040 MWe. Druhou elektrárnou, která získává energii ze štěpné řetězové reakce je elektrárna Temelín. Tato elektrárna je modernější, než elektrárna Dukovany a elektrickou energii vyrábí od roku 2002. V elektrárně Temelín pracují jako zdroje tepla dva tlakovodní reaktory typu VVER-1000/V320 s celkovým elektrickým výkonem 2133 MWe. [10]

Elektrárna Temelín je elektrárnou, která bude podle předpokladů elektrickou energii vyrábět minimálně dalších 30 let. Z tohoto důvodu se i společnost ŠKODA JS a.s. zabývá zdokonalováním a modernizováním provozu obou temelínských bloků.

Kvalita provozu i jeho bezpečnost souvisí s pravidelnými revizemi zařízení a komponent, které jsou nezbytně nutné pro chod a provoz výrobny.

Jedním z nejdůležitějších částí celého provozu jaderné elektrárny je jaderné palivo. V elektrárně Temelín mluvíme o mírně obohaceném uranu U^{235} s obohacením 4,2 % až 4,3 %. Po částečném vyhoření tohoto izotopu v jaderném reaktoru se jaderném palivo v palivových souborech umístí vně reaktor do skladovacích bazénů, ve kterých palivo postupně chladne.

V současné době se pracuje na zlepšení možnosti inspekce a kontroly palivových souborů s přesnějšími výsledky při minimalizaci dopadu doby inspekce na harmonogram odstávky výrobního bloku. Jedním z těchto zařízení je inspekční sloupek (N-SIO) pro kontrolu stavu vyhořelého paliva. [10]

1 JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN

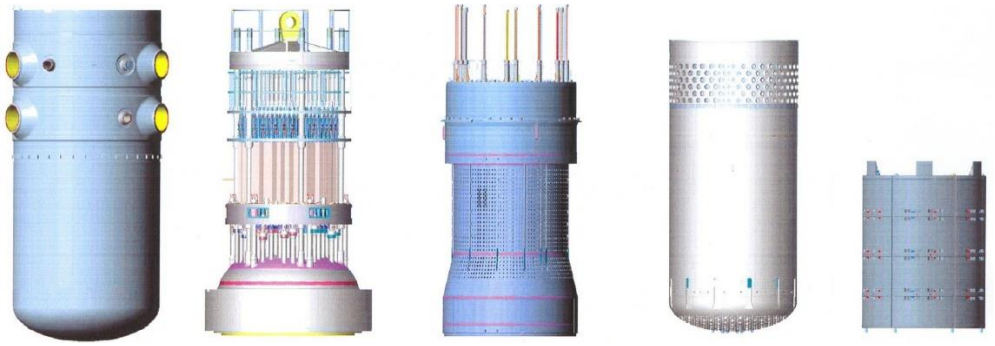
Jaderná elektrárna Temelín (ETE) je jedna ze dvou českých jaderných elektráren. Nachází se 5 km od Týna nad Vltavou. Tato elektrárna disponuje dvěma výrobními bloky. Oba bloky jsou vybaveny tlakovodními reaktory ruského typu VVER, přesně VVER-1000/V320. Spuštění prvního bloku elektrárny Temelín bylo zahájeno v roce 2000 a zkušební provoz byl zahájen v roce 2002. Spouštění druhého bloku bylo zahájeno v roce 2002 a zkušební provoz pak v roce 2003. V letech 2013 a 2014 byl instalovaný výkon obou bloků zvýšen po využití výkonových rezerv na zhruba 1078 MWe a 1055 MWe. Tento stav platí i nadále. Celkový instalovaný výkon ETE je tedy zhruba 2133 MWe, což je asi 10,4% celkového instalovaného výkonu všech elektráren v České Republice. Mluvíme tedy o velmi významném zdroji elektrické energie. [10]

VVER-1000 je pokročilým typem tlakovodního reaktoru východního typu. V následující tabulce (Tabulka 1) jsou uvedeny základní parametry.

Tabulka 1 - Parametry a informace o reaktoru VVER-1000 [14]

VVER-1000/V320	
Verze	V320
Typ reaktoru	tlakovodní
Tepelný výkon	≈ 3 000 MW
Elektrický výkon	≈ 1 000 MW
Chladivo	H_2O
Moderátor	H_2O
Palivo	UO_2
Výška aktivní zóny	3,5 m
Průměr aktivní zóny	3,16 m
Tloušťka stěny nádoby	70 mm
Průtok chladiva	21 500 m^3/h
Počet palivových souborů	151 ks
Počet palivových proutků	331 ks
Hmotnost paliva	66 t
Obohacení čerstvého paliva	≈ 4,45 %
Průměr palivového proutku	9,1 mm
Teplota chladiva VSTUP	≈ 289 °C
Teplota chladiva VÝSTUP	≈ 324 °C
Počet smyček	4 ks

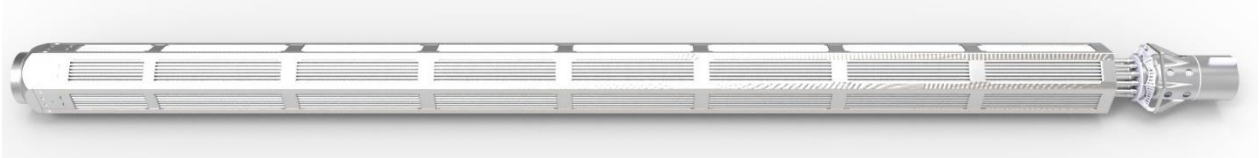
Na následujícím obrázku (Obrázek 1) je patrné základní sestavení reaktoru.



Obrázek 1 - Sestava reaktoru VVER-1000 [14]

1.1 Palivový soubor

Jaderná elektrárna Temelín používá jako palivo v jaderném reaktoru VVER-1000 pelety UO_2 s obohacením při první zavážce 1,3 % – 3,8 % U^{235} (mírně obohacený uran). Tyto pelety jsou skládány do palivových prutů a pruty jsou následně skládány do distančních mřížek palivového souboru (Obrázek 2). Z těchto souborů se pak skládá aktivní zóna (AZ) reaktoru. Každý palivový soubor je tvořen 312 palivovými proutky s obohaceným uranem. Každý palivový soubor (PS) pak obsahuje 18 absorpčních prutů a jednu centrální měřicí trubku. Hmotnost jednoho palivového souboru je pak přibližně 800 kg. Na obrázku (Obrázku 3) jsou vidět hlavní komponenty PS. [10]



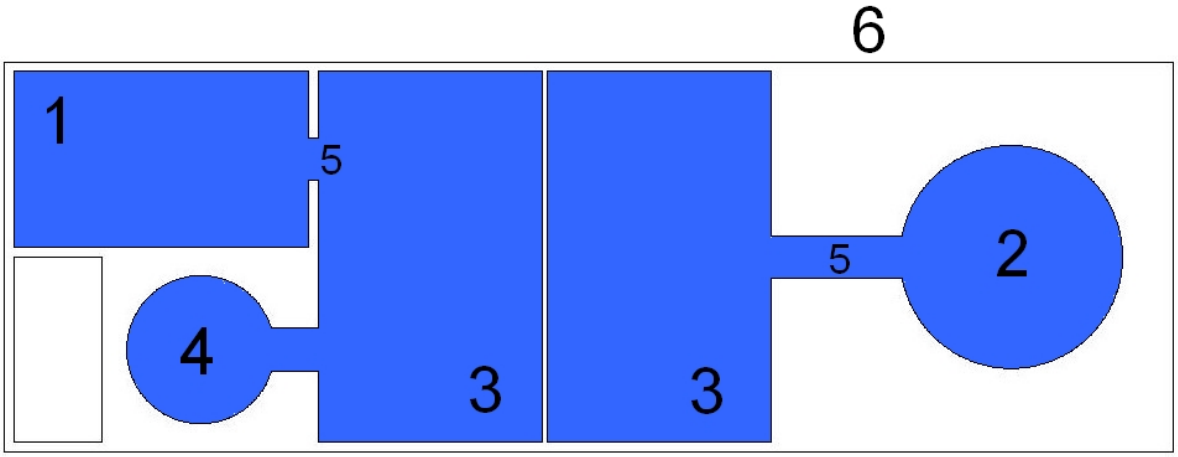
Obrázek 2 - Palivový soubor TVSA-T

Obrázek 3 - Hlavní části PS v pořadí (Dolní část, Horní část a Distanční mřížka)

1.2 Bazén vyhořelého paliva

Součástí reaktorového sálu je bazén pro ukládání vyhořelého paliva. Tento bazén je částečně spojen s reaktorovou šachtou, průchod lze rozdělit hermetickým hradítkem. Při odstavení reaktoru a přístupu k aktivní zóně je tento bazén spojen přímo s reaktorem prostřednictvím koridoru, který je situovaný pod vodou. V tomto prostředí pak dochází k vyjímání již vyhořelých PS z AZ a jejich následné přesouvání do bazénu s vyhořelým palivem. V současné době se tak děje vždy po ukončení jedné palivové kampaně a vyhořelé PS, které jsou z AZ vyjímány a měněny za čerstvé PS, zůstávají v AZ cca 5 let. Tyto PS následně po dobu několika let (průměrně 8 let) chladnou v bazénu vyhořelého paliva. Vyhořelé palivové soubory mají po vyjmutí z AZ značný zbytkový tepelný výkon a jsou silným zdrojem radioaktivity. Po snížení tepelného výkonu i úrovně radioaktivity se tyto soubory ukládají do speciálních kontejnerů. V nich se pak odváží v suchém stavu do meziskladu vyhořelého paliva, kde jsou skladovány po dobu desítek let. Bazén vyhořelého paliva je tedy jedním ze stupňů jaderného palivového cyklu. [3]

V době palivové kampaně a uzavřeném reaktoru jsou tyto bazény překryty horním krytem. Umístění jednotlivých bazénu na reaktorovém sálu je znázorněno na Obrázku 4.



Obrázek 4 - Dispozice bazénu s vyhořelým palivem v reaktorovém sálu (1 – Bazén sekce 5, 2 – Reaktorová nádoba, 3 – Bazény sekce1, 2, 3 a 4, 5 - koridory pro průjezd zavážecího stroje, 6 – Reaktorový sál)

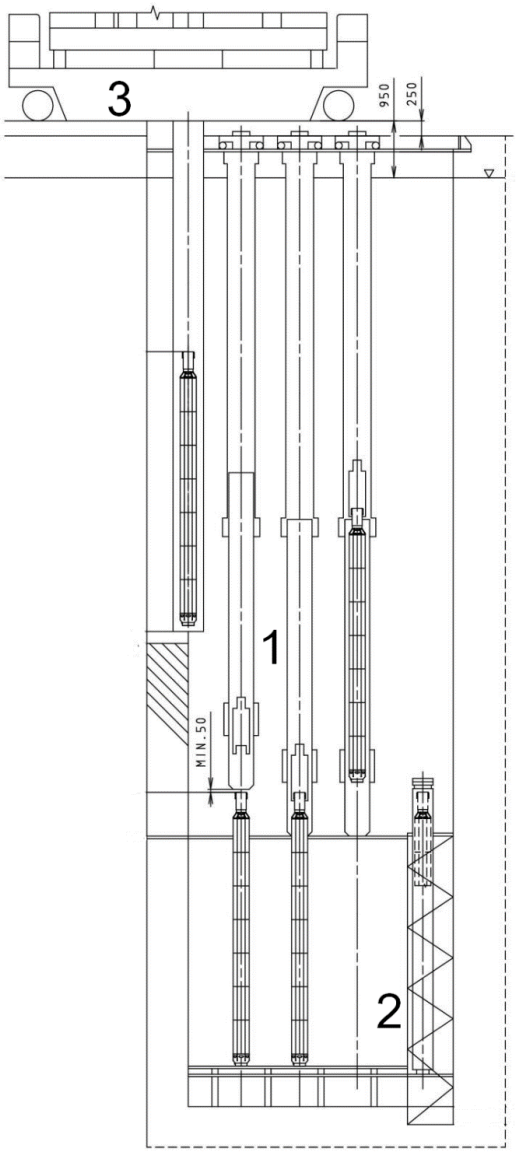
1.3 Nový stend inspekcí

Nový stend inspekcí (N-SIO) je součástí programu pro kontrolu různých typů palivových souborů (PS) určených pro reaktory typu VVER-1000/V320. Toto zařízení je pak skladováno v prostorách budovy aktivních pomocných provozů (BAAP).

Zařízení N-SIO (Obrázek 5) nahrazuje stávající mobilní stend inspekcí a oprav (M-SIO).

Tato práce se týká pouze části návrhu zařízení N-SIO, konkrétně návrhu inspekčního sloupu, jehož úkolem je fyzicky provádět požadovanou inspekci na palivových souborech.

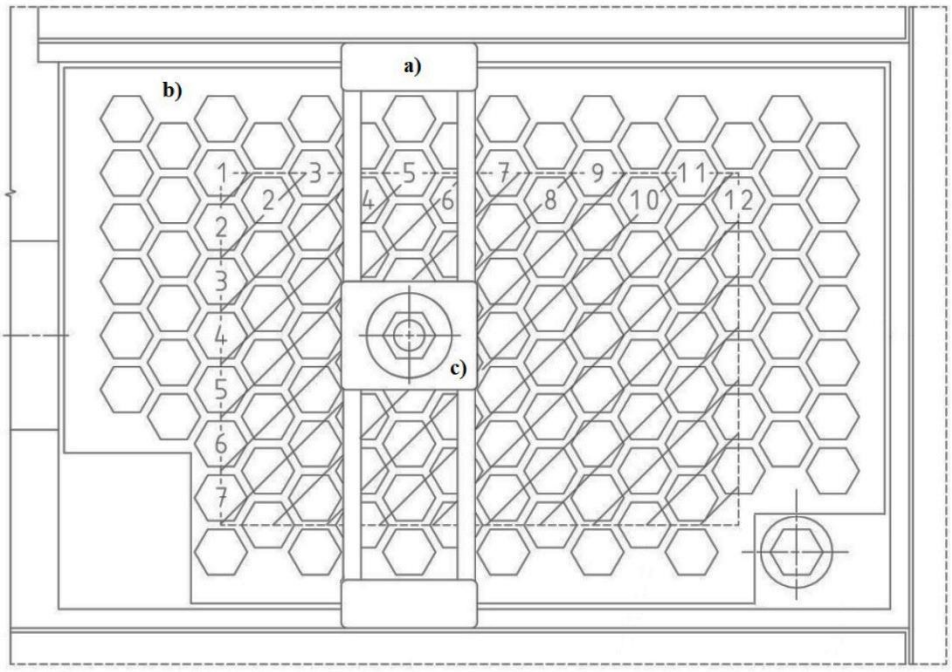
Následující kapitoly postupně popisují nároky, požadavky a samotný návrh části tohoto projektu.



Obrázek 5 - Předběžné návrhové schéma zařízení N-SIO (1 – Navrhovaný inspekční sloup, 2 – Koš inspekcí a oprav (možné budoucí rozšíření projektu), 3 – Manipulační most) [11]

2 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY A POPIS ZAŘÍZENÍ

Sloup inspekcí (SI) je zařízení, které má za úkol provést inspekci vyhořelého palivového souboru z reaktoru VVER-1000/V320 v prostorách bazénu sekce 5 (S5), (viz. Obrázek 6) na reaktorovém sále elektrárny Temelín 1 a Temelín 2. Pro tento úkol musí být SI schopen zvládat manipulaci s palivovými soubory (PS) v prostorách vybraných absorpčních trubek, kde budou PS uloženy. Stejně tak nad těmito trubkami. SI umožňuje kontrolu 61 PS umístěných, ve vybraných buňkách palivové mříže (celé buňky vymezeny čárkovanou čarou). Manipulační most (MM) je schopný navézt SI pouze nad těchto 61 pozic kompaktní mříže bazénu S5. Pokud je třeba provádět inspekci na PS, na které MM nedosáhne, je třeba využít hlavní zavážecí stroj, který palivové soubory v bazénu S5 vhodně přemístí. [11]



Obrázek 6 - Schéma bazénu B2 s naznačeným vymezeným prostorem (a) – MM, b) – Mříž bazénu, c) - SI) [11]

SI je navržen tak, aby veškeré operace, které se během inspekce na PS budou provádět, byly prováděny nad místem uložení PS, bez posunu na jinou polohu.

Rozdělení inspekce je následující:

- Vizuální kontrola PS
- Kontrola zkrutu PS
- Kontrola průhybu PS
- Kontrola délky (prodloužení) PS

Samotné zařízení SI se pak skládá z manipulačního mostu, který jezdí nad bazénem S5 a nese sloup s výsuvným inspekčním blokem. Sloup pak zajišťuje zachycení PS v jednotlivých buňkách bazénové mříže a jeho vtažení do inspekčního bloku (IB).

2.1 Podmínky pro SI určené prostředím

V prostorách reaktorového sálu a bazénu vyhořelého paliva S5 bude na zařízení SI působit řada faktorů, které souvisí s tímto pracovním prostředím.

2.1.1 **Podmínky okolí**

V reaktorovém sále, se teplota může pohybovat od 15 °C do 40°C. Tlak v kontejnmentu má hodnotu mezi 85 kPa a 183 kPa. Relativní vlhkost je maximálně 90 %. Absorbovaná dávka záření, se může pohybovat v rozmezí $2{,}8 \cdot 10^{-5}$ Gy·hod^{-1} až $2{,}8 \cdot 10^{-3}$ Gy·hod^{-1}. Na obrázku (Obrázek 7) je patrný průběh růstu radiačního zatížení ve vzdálenosti od PS.

V bazénu vyhořelého paliva jsou teploty rozdílné. Teplota vody je při plánovaném zatížení maximálně 50 °C a při nouzové vykládce celé AZ maximálně dosahuje 70 °C. Diametrálně rozdílná je teplota při havarijních podmínkách. Tomuto stavu se říká podmínky pod obálkou (velké netěsnosti). Tato teplota je předepsána maximálně do 150 °C. Pokud hovoříme o aktivitě bazénové chladicí vody, hodnoty objemové aktivity jsou pak ohraničeny $3{,}7 \cdot 10^{5}$ Bq·l^{-1}. Dávkový příkon je pak maximálně 10 000 Gy·h^{-1}. Za dobu provozu zařízení (30 let) je udána maximální dávka $2{,}6 \cdot 10^{9}$ Gy. Rychlost proudění vody v bazénu je 0,11 m·s^{-1}.

Pro dezaktivaci mříží a ostatních komponent se mohou použít následující roztoky:

- 10 g/l NaOH + 5 g/l $KMnO_4$
- 30 g/l $H_2C_2O_4$ – kyselina šťavelová
- 10 g/l $H_2C_2O_4$ + 1 g/l HNO_3 nebo 10 g/l $H_3C_6H_5O_7$ – kyselina citronová

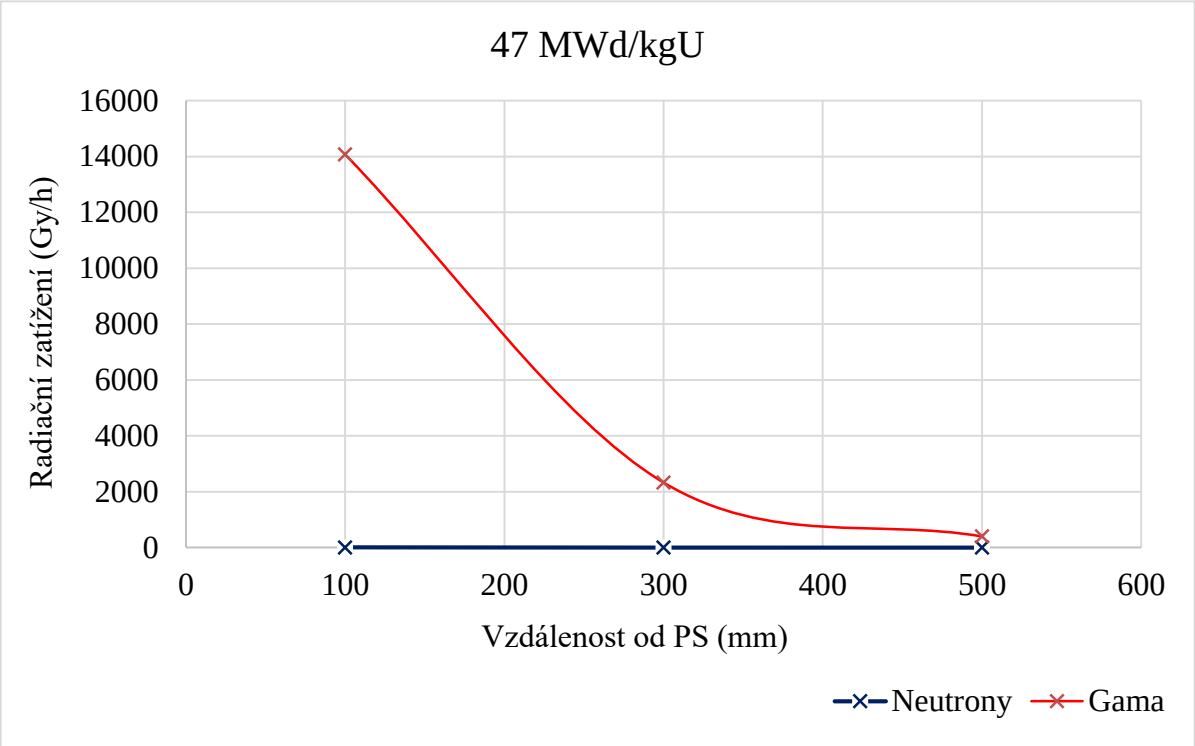
Teploty těchto roztoků jsou do 100 °C. Úkon dezaktivace se musí uskutečňovat v souladu se směrnicemi platnými na JE.

Parametry, které udávají radiační zatížení, jsou uvedeny v následující tabulce. Podmínky, za kterých platí tyto parametry, jsou tyto:

- Konzervativní případ pro obohacení do 4,3 %
- PS s vyhořením 47 MWd/kgU
- Chlazení 10 dní od vyvezení AZ [11]

Tabulka 2 - Radiační zatížení v okolí PS [3]

100 mm od PS		
dose rate Gama	≈ 14,08	kGy/h
dose rate Neutrony	3,000	mGy/h
300 mm od PS		
dose rate Gama	≈ 2,33	kGy/h
dose rate Neutrony	0,100	mGy/h
500 mm od PS		
dose rate Gama	≈ 0,40	kGy/h
dose rate Neutrony	0,007	mGy/h



Obrázek 7 - Grafická závislost radiačního zatížení v okolí PS [3]

2.1.2 **Chemické látky zakázané v primárním okruhu**

Prvky uvedené v Tabulce 3, jsou-li přítomny ve výrobcích nebo materiálech, jež přicházejí do styku s primární kapalinou a částmi, které tvoří primární okruh, mohou vyvolávat (podle jejich podstaty) korozi, znečištění kapaliny, produkty ozáření nebo mohou být odpovědné za neutronové otravy.

Podmíněné dovolené prvky jsou zakázány jako hlavní složka výrobků.

Tabulka 3 - Přehled zakázaných a podmíněně dovolených prvků [3]

Zakázané prvky	
Rtuť	Vizmut
Cín	Arsen
Kadmium	Měď
Antimon	Vzácné zeminy
Stříbro	Galium
Kobalt	Indium
Trojmocné železo	
Podmíněně dovolené prvky	
Olovo	Hliník
Zinek	

Tyto prvky jsou za určitých (níže uvedených) podmínek povoleny.

Poznámky k použití:

Výrobky a materiály, které obsahují stříbro, kobalt, antimon, vzácné zeminy jsou zakázány z důvodů problému aktivace. Kontaminace povrchů nerezavějících slitin (reaktoru) a primární kapaliny solemi rtuti, olova, mědi a trojmocného železa je zakázána z důvodu rizika koroze pod napětím slitin niklu a zirkonu. Kovy s nízkou teplotou tání, tj. olovo, rtuť, galium, kadmium, cín, arsen, indium, antimon, vizmut podporují štěrbinovou korozi nerezavějících ocelí a slitin niklu. Z tohoto důvodu jsou zakázány ve složení výrobků používaných ve styku se zařízeními. Použití olova je dovoleno za podmínky, že je kontrolováno jeho použití v následujících funkcích a za podmínky, že neexistuje žádný náhradní materiál (biologická ochrana).

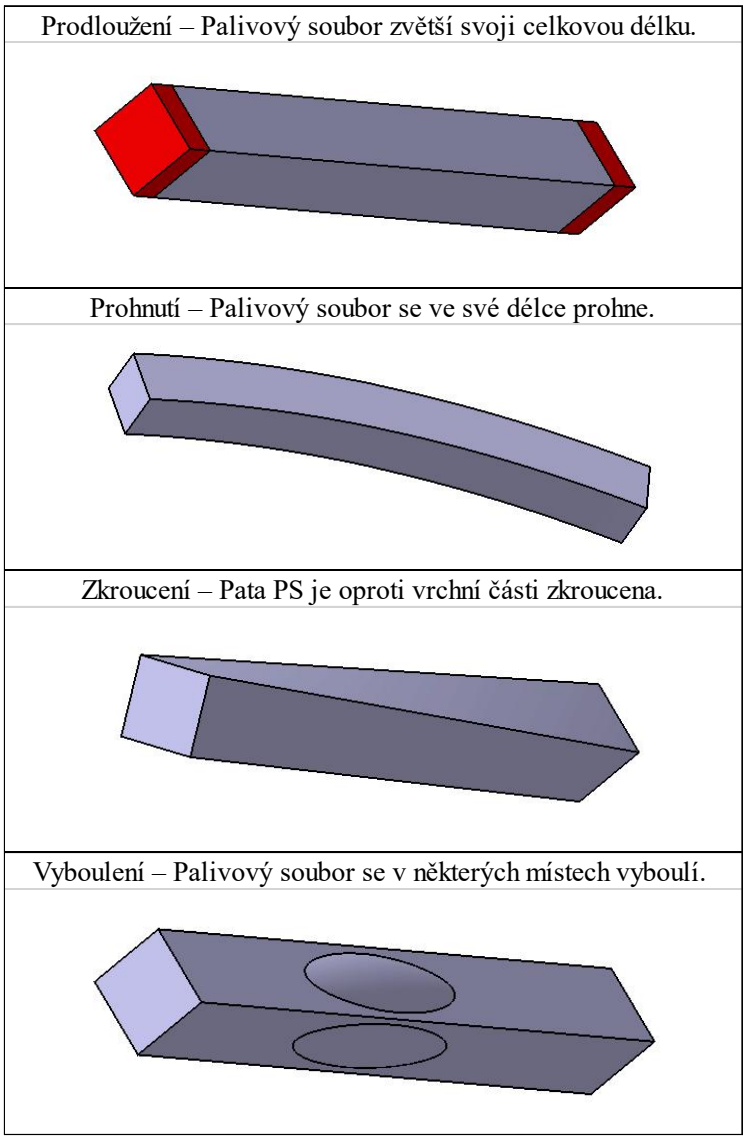
V situaci po poruše, při zavádění systému postřiku se zásaditým pH vyvolává u hliníku rychlý vývoj vodíku. Z tohoto důvodu je hliník (ve formě kovu) zakázán jako základní prvek tvořící systém ochrany; je omezen na jiná zařízení stínění a pro části, u nichž je technologicky nenahraditelný. V téže situaci po poruše vyvolává zinek vývin vodíku, ale pomaleji. Zinek je z tohoto důvodu tolerován v konstrukcích ze zinkovaných plechů (kabelové lávky, pláště odsávání a kovové rámové konstrukce). Je tolerován jako složka barev.

Z důvodů rizika koroze kovových částí, zvláště z důvodů omezení jevů důlkové a štěrbinové koroze pod napětím u austenitických nerezavějících ocelí a slitin niklu, ale též z důvodů koroze pod napětím nízkolegovaných ocelí v určitých podmínkách vnějšího prostředí, je omezen obsah halogenů (chlor, fluor, a brom) a síry. Použití těchto prvků musí být ve výrobcích minimalizováno a podléhá schválení zákazníka. [3]

3 ZPŮSOB KONTROLY PALIVOVÉHO SOUBORU

Existuje mnoho typů palivových souborů (PWR, BWR, VVER, …), každý má velmi přesně předepsané rozměrové tolerance. Palivové soubory jsou v aktivní zóně (AZ) reaktoru silně zatěžovány, a to jak termicky, mechanicky, tak i radiačně. Z tohoto důvodu se mohou během provozu měnit rozměry PS. V důsledku gradientů teploty a neutronového toku mohou být PS zkrouceny, ohýbány a protaženy. Deformace PS je vždy komplikací pro provoz jaderné elektrárny (JE).

U reaktorů typu BWR, PWR a VVER hrozí, že při deformaci kazety nebude možné zasunout řídicí tyč do aktivní zóny. U reaktorů typu PWR a VVER pak hrozí nebezpečí, že při operaci s PS se jeden PS dotkne druhého, čímž může dojít k poškození. Tato poškození a deformace jsou patrná z Obrázku 8. [2]



Obrázek 8 - Deformace PS

Pro měření těchto deformací se berou v potaz dvě varianty. Tou první je varianta ultrazvukovými sondami, druhou je měření pomocí LVDT sond.

U vyhořelých PS je třeba provést i vizuální kontrolu. Kontrola palivových souborů je v případě elektrárny Temelín 1 a 2 prováděna třemi kamerami, které jsou rovnoměrně rozmístěny v úhlu 120°. Při vytahování PS z kompaktní mříže bazénu se provádí kontrola prvních tří stran PS. Před zasunutím PS zpět na místo se kamery otočí o 60° kolem osy palivového souboru; při zasouvání se provede kamerový záznam zbylých tří stran PS.

Během jakéhokoliv měření, ať už jde o jakýkoliv typ a metodu měření, je nutné zohlednit elektromagnetickou komptabilitu. Především UZ zařízení musí být odolná proti vnějšímu rušení a samo nesmí produkovat nadlimitní rušení dle *IEC 61000-6-4, ed.2 Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 6-4: Kmenové normy - Emise - Průmyslové prostředí.* [11]

3.1 Možnosti měření

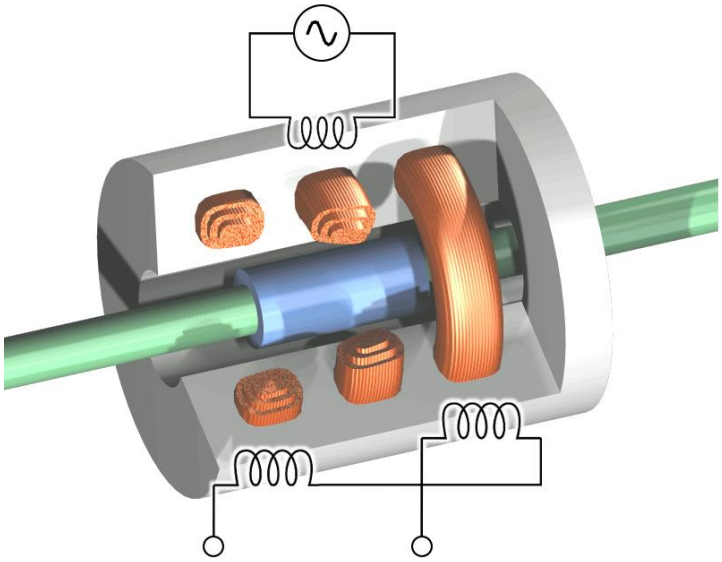
Měření vyhořelých PS je možné několika způsoby. V současné době se uvažuje o měření pomocí ultrazvukových (UZ) sond, 3D laserové triangulace a využitím jednoduchých lineárních sond fungujících na principu LVDT. Dále jsou podrobně popsány metody měření s využitím LVDT čidel. [11]

3.1.1 **Měření pomocí LVDT sond**

Jde o měření, při němž se využívá elektrického transformátoru typu *Linear variable differential transformer* (LVDT) v češtině lineární diferenciální transformátor. Obecně se tento způsob měření tedy označuje LVDT (Obrázek 9).

LVDT se používá pro měření lineárního posuvu. Elektromechanický snímač LVDT se také využívá k přeměně mechanického pohybu nebo vibrací, zejména přímočarého pohybu, na poměrný elektrický proud nebo napětí.

Tento transformátor se skládá ze tří elektromagnetických cívek umístěných okolo jádra. Jádro je zpravidla z feromagnetického materiálu a prochází osou trubice, ve které je pak tato sestava umístěna. Jádro je připevněno k předmětu, jehož poloha má být následně měřena. Prostřední cívka je primární a zbylé dvě krajní cívky jsou cívkami sekundárními.



Obrázek 9- Schématické znázornění LVDT [15]

Funkce měření LVDT je založena na elektrických principech transformátoru. Na primární cívku je přiveden střídavý proud o frekvenci 1 kHz až 10 kHz. To má za příčinu indukování napětí v sekundární části. Pokud jádrem začneme pohybovat, vzájemné indukčnosti vinutí se mění, což způsobuje i změnu indukovaného napětí v sekundárním obvodu transformátoru. Sekundární (krajní) cívky jsou zapojeny antiparalelně, takže výstupní napětí je tedy rozdílové napětí obou sekundárních napětí. Pokud zůstane jádro ve středové pozici, rozdílové napětí je nulové. Napětí je nulové z toho důvodu, že v sekundárních cívkách se indukuje stejná absolutní velikost napětí, ale s opačnou polaritou vzhledem k jejímu zapojení. Pokud budeme jádrem posouvat v jednom směru, napětí v jedné sekundární cívce se zvyšuje, zatímco v druhé klesá. To způsobuje zvýšení výstupního napětí z nuly na maximum ve fázi s primárním napětím. Pokud pohneme jádrem naopak, opět vzroste sekundární napětí z nuly na maximum, toto napětí má však opačnou polaritu, než je tomu u napětí primárního.

LVDT je zařízení analogové, je tedy třeba přeložit výstupní analogový signál do užitečného digitálního signálu. Pro toto zpracování se využívá oscilátorů a demodulátorů. Oscilátor je navržen tak, aby poskytoval stabilní sinusovou vlnu pro řízení převodníku a čtvercovou vlnu pro demodulátor. Demodulátor je pak navržen tak, aby byl schopen zesílit výstupní signál z převodníku a přeměnil ho na velmi přesné stejnosměrné napětí, které je přímo úměrné posunutí jádra vůči středu LVDT. U vysoce kvalitních lineárních měničů je pak vztah mezi polohou a fází lineární. Oscilátor a demodulátor pak usnadňují právě přechod mezi polohou a fází.

Využití tohoto principu měření se uplatní v mnoha sférách. Využití například pro automatické řídicí systémy, nebo jako mechanické senzory pohybu v měřicích technikách (Obrázek 10).

Tímto jednoduchým způsobem jsme schopni měřit, určit a vyhodnotit polohu snímaného prvku. [1]

Obrázek 10 - LVDT sonda [8]

3.1.2 **Měření pomocí UZ sond**

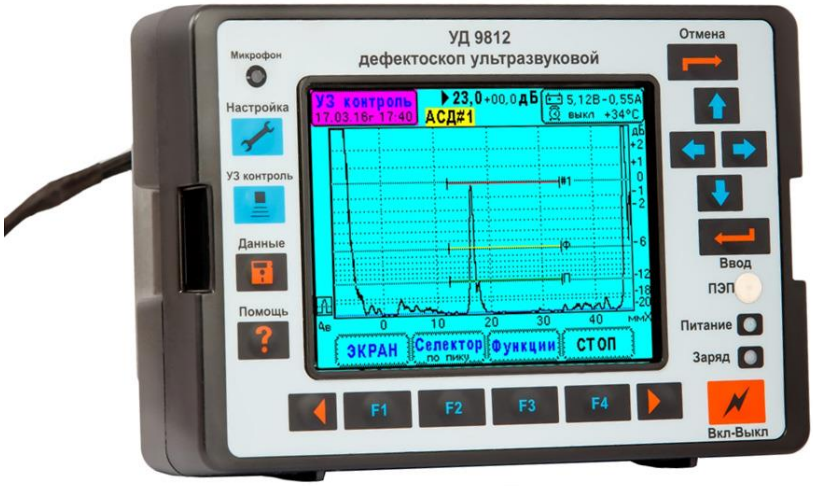
Zkoušky ultrazvukem patří mezi základní nedestruktivní metody kontroly materiálů. Tato technologie využívá principu průchodu ultrazvukových vln homogenním prostředím. Tím, jak vlnění prochází postupně prostředím, dochází ke snižování amplitudy UZ signálu. Pokud vlna narazí na rozhraní dvou prostředí (materiálů), dojde k odrazu a lomu vlnění. Tato odražená vlna se detekuje a vyhodnocuje.

Touto metodou jsme schopni měřit a dohledat plošné vady, lineární vady, objemové vady. Stejně tak jsme při použití vhodné sondy schopni měřit např. tloušťky stěn či povlaků. [4]

Defektoskopie využívá dvě různé metody měření. Metodu průchodovou a metodu odraznou. Pro kontrolu PS v IB zařízení NSIO jsou využívány UZ sondy pracující na principu odrazné metody.

Při této metodě se využívá pouze jedna sonda, které je zároveň jak vysílačem, tak i přijímačem. Vysílač vyšle UZ pulzy, které jsou následně jako odražený signál detekovány tou samotnou sondou. Zařízení sondy z odraženého signálu určí a vyhodnotí přesnou vzdálenost místa odrazu. Tyto sondy dle rovnoměrnosti materiálu dále dělíme na přímé a úhlové. [5]

Pro zpracování signálů, které nám podává UZ sonda, je možné využít defektoskop UD9812 od ruského výrobce Fpribor (Obrázek 11). Tento defektoskop se nejčastěji používá právě pro ultrazvukové zkoušení plastových a kovových výrobků o různých tloušťkách (od 0,5 mm do 6000 mm). Princip defektoskopu je založen na analýze doby příchodu ultrazvukových vln odrážejících se od povrchu zkoumané plochy, což je uplatněno i při inspekci PS. [6]



Obrázek 11 – Defektoskop UD9812 [6]

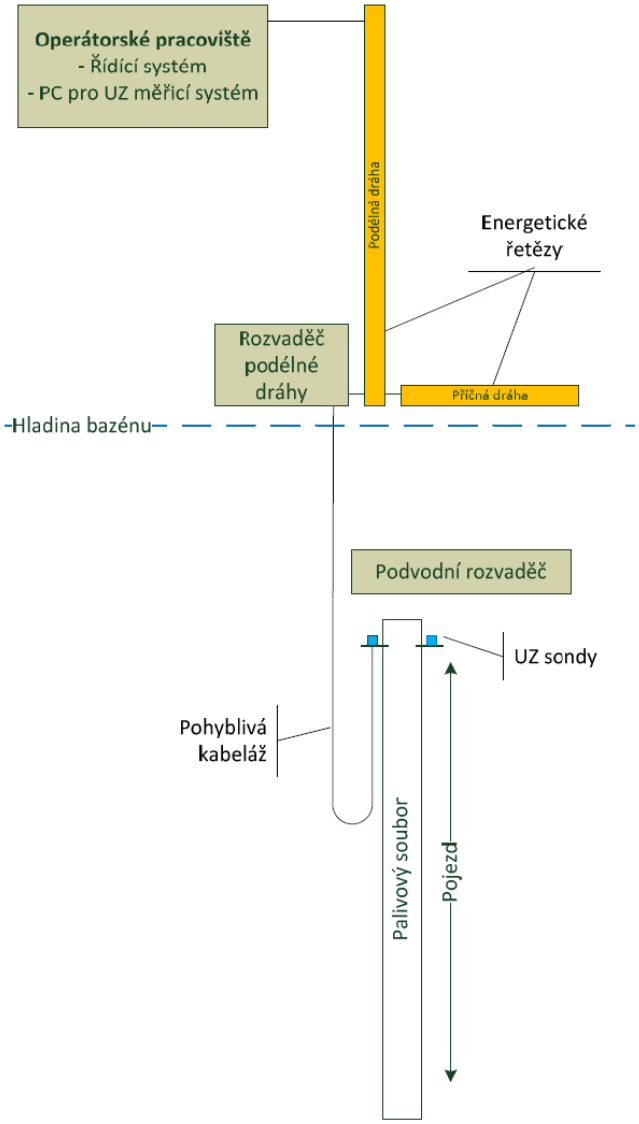
UZ sondy, které budou defektoskopu podávat signál (viz. Obrázek 6), budou použity od stejného výrobce, jako výše uvedený přístroj. Protože zařízení N-SIO má pracovat v prostředí vody, tyto UZ sondy musejí být ponorné (Obrázek 12). Tyto typy snímačů jsou použitelné pro kontrolu desek, trubek, tyčí, surových, nebo hotových ponorných medií atd. V následující tabulce jsou uvedeny jejich základní parametry.

Tabulka 4 - Parametry UZ sond

Kmitočtové pásmo	200 kHz - 10 MHz (+/- 10 %)
Piezo element	13 mm, nebo 25 mm
Materiál snímače	Ocel 303
Rozměry snímače	16x45 mm, nebo 32x32 mm
Typ konektoru	BNC

Obrázek 12 - UZ sonda [9]

Na následujících obrázku (Obrázek 13) je uvedeno jednoduché blokové schéma zapojení UZ měřícího systému spolu s PS.



Obrázek 13 - Blokové schéma zapojení UZ systému pro měření PS [11]

3.1.3 **Měření pomocí 3D laserové triangulace**

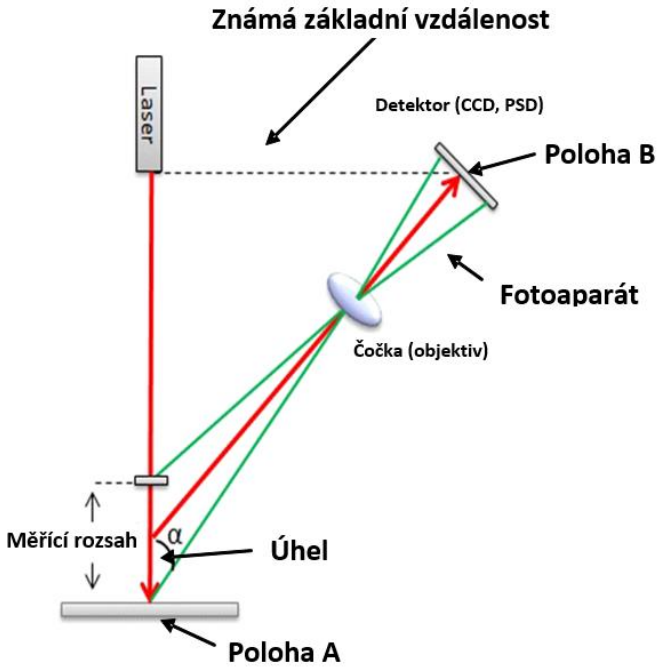
Tato metoda je vcelku nová a využívá technologii 3D laserové triangulace. Tato metoda se využívá v mnoha komerčních oblastech, např. zajištění jakosti, výrobní procesy, atd. Pro potřebu jaderné energetiky byla tato metoda vyvinuta společností Mebema AB ze Švédska pro měření jaderného paliva. Tato společnost je subdodavatelem společnosti Westinghouse electric Company.

Tato nová metoda měření paliva umožňuje měřit prodloužení, vyboulení, zkroucení i průhyb palivových souborů BWR, PWR i VVER. Systémové prvky senzorových polí, z nichž každé pole je sestaveno z lineárního laseru a megapixelového fotoaparátu. Vše je uspořádáno na rozvaděči.

Seskupení je schopno měřit všechny strany PS. Nový systém snižuje dobu měření na 0,1 s a zajišťuje snadnou manipulaci. Dodavatel také zaručuje větší přesnost oproti ostatním metodám.

Princip tohoto měření:

Laserový paprsek je promítán na cíl, který má být měřen pod známým úhlem *α.* Fotoaparát na známém posunu od laseru zobrazuje promítaný obraz. Úhel, kterým kamera vidí laser v poloze A, lze vypočítat z polohy snímače v poloze B. Pokud je známa jedna strana a dva úhly trojúhelníku, lze vypočítat vzdálenost do polohy A (Obrázek 14). [2]



Obrázek 14- Princip měření pomocí 3D laserové triangulace[2]

4 KONSTRUKČNÍ NÁVRH INSPEKČNÍHO SLOUPU

Tato kapitola popisuje hlavní konstrukční komponenty inspekčního sloupu a některé mechanické prvky, které jsou tohoto inspekčního sloupu rovněž součástí.

4.1 Manipulační most

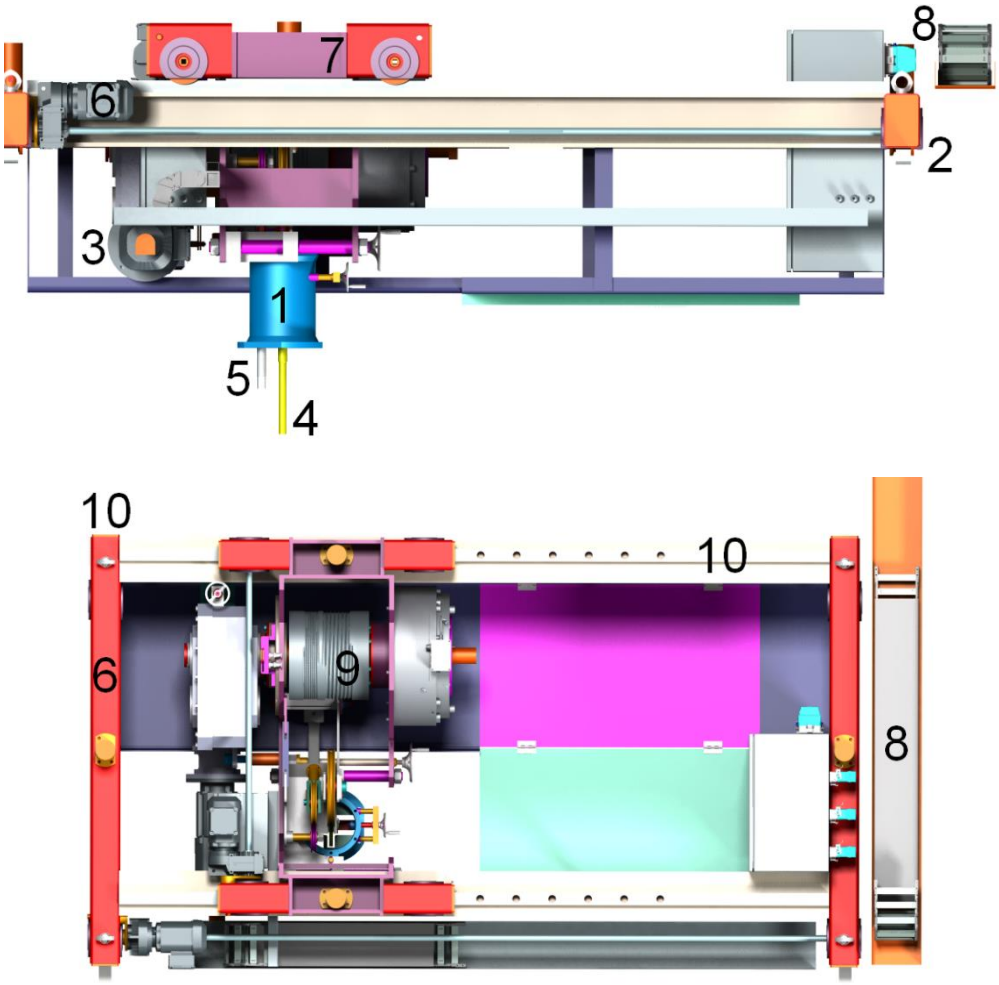
Manipulační most (Obrázek 15) je nosníkem s pojezdem, a zároveň mechanických najížděním. Most je situován do prostoru mezi hladinou bazénu a spodní částí zavážecího stroje. Most je schopen pojíždět v určeném prostoru nad bazénem S5 a najet na pozici palivového souboru. Pomocí hlavního lana a speciálního záchytu lze uchopit PS a vtáhnout ho do IB. Vedle hlavního, tažného a nosného lana je tzv. lanové zdvihadlo, které ovládá speciální záchyt a umožňuje PS zachytiti a upustit.

V jednotlivých polohách MM umožňuje aretaci. Tímto je celé zařízení stabilizováno i při seizmických událostech.

Další součástí MM je kabeláž, která je na most vedena energetickým řetězem, který je uložený v krytu podél bazénu. Celá kabeláž je snadně demontovatelná, neboť je na obou stranách opatřena konektory. Celý MM má instalovány dva rozvaděče NN, které obsahují měniče pro jednotlivé pohony a také vstupní a výstupní porty pro všechna čidla. [11]

Limitace pro MM:

- Zdola je MM limitován hladinou chladiva bazénu (36200 mm)
- Shora je MM limitován spodní částí konstrukce zavážecího stroje (37150 mm)
- Bezpečnou vzdáleností od těchto elementů rozumíme 50 mm [11]



Obrázek 15 - Dispozice manipulačního mostu s veškerým vybavením (Popis obrázku je uveden níže) [11]

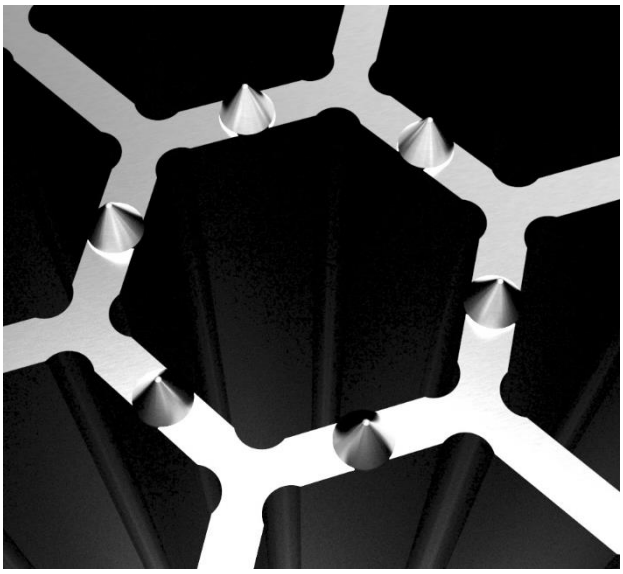
Tabulka 5 - Popis Obrázku 15

1	Příruba pro upevnění a držení SI
2	Pojezd
3	Pojezd
4	Nosné lano PS
5	Ovládání záchytu PS
6	Pohon a pojezd
7	Pohon a pojezd
8	Elektrická kabeláž
9	Naviják nosného ocelového lana
10	Kolejnice

4.2 Mříž bazénu S5

Mříž se skládá z absorpční části, nosné desky, stavitelných sloupů a souboru dílů určených pro montáž mříže (Obrázek 17) do skladovacího bazénu.

Absorpční část se skládá ze dvou desek (horní a spodní) se šestihrannými otvory, do kterých je navařeno 127 šestihranných absorpčních trubek pro uložení vyhořelých palivových kazet. Na horní desce jsou 4 úchyty pro přenos a vodicí drážky pro umístění per bazénu, naváděcí hranoly okolo absorpčních trubek. Na spodní desce absorpční části je 10 pevných opěr, které jsou určeny pro dosednutí na nosnou desku, a vytvářejí mezeru pro cirkulaci vody. Kolem každého otvoru pro PS jsou namontovány naváděcí kužely (Obrázek 16), což je patrné z následujícího obrázku.



Obrázek 16 - Naváděcí kolíky pro snažíš zasunutí vyhořelého PS do absorpční části [11]

Nosná deska o tloušťce 80 mm má 4 vodicí drážky pro umístění per bazénu, 6 naváděcích kolíků pro umístění absorpční části, 127 otvorů o průměru140 mm pro cirkulaci vody a 19 otvorů o průměru 90 mm pro seřízení stavitelných podpěr.

Mříž je vnitřní, funkční část bazénu, která slouží pro uložení vyhořelých palivových souborů. Tato mříž je patrná z následujícího obrázku.

Mříže musí zajišťovat cirkulaci vody kvůli odstranění zbytkového tepla uvolněného palivovými kazetami, umístěnými v absorpčních trubkách.

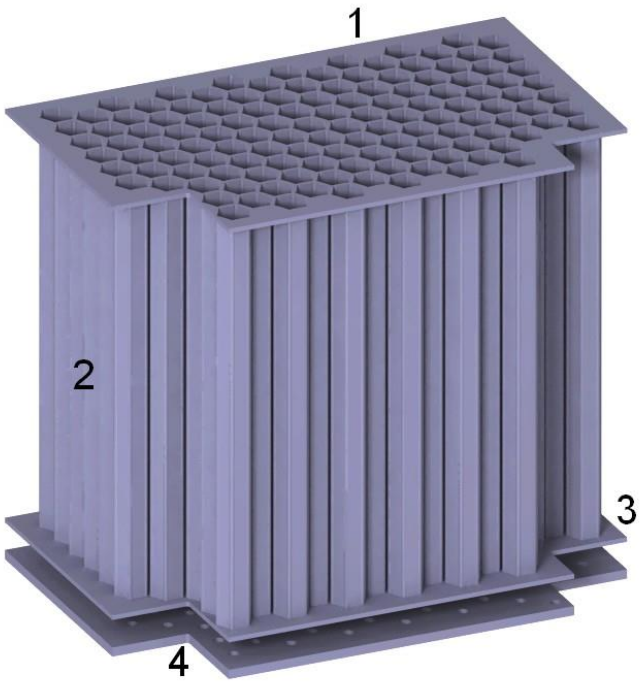
Při umístění čerstvých palivových kazet do mříží musí mříže zajišťovat efektivní koeficient množení neutronů skladovacího bazénu na hodnotě maximálně 0,95.

Mříže musí zajišťovat průchodnost palivových kazet v absorpčních trubkách.

Mříže musí být provozuschopné při maximálním výpočtovém zemětřesení s intenzitou 7 stupňů škály MSK-64 (stupnice Medvěděv, Sponheuer, Kárník na zhodnocení makroseizmických účinků zemětřesení), probíhajícím zároveň s haváriemi, až do maximální projektové havárie.

Úchyty pro přenos mříže musejí být spolehlivé a pohodlné pro přemístění mříže a testované vahou mříže, zavěšením na hák zdvihacího zařízení po dobu 15 minut. Při prohlídce po testování se nesmějí objevit žádné deformace, praskliny, trhliny.

Ustanovená životnost mříží činí nejméně 30 let. [11]



Obrázek 17 - Dispozice mříže bazénu S5 (1 - hlavní horní mříž, 2 – absorpční část s trubkami, 3 – hlavní dolní mříž, 4 – nosná deska) [11]

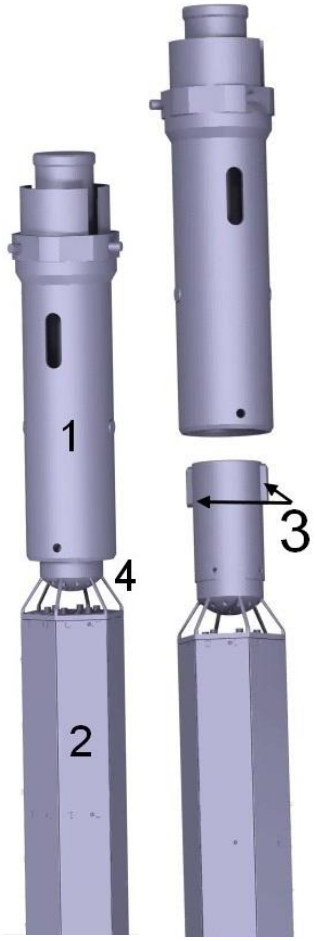
Základní parametry a rozměry mříže jsou uvedeny v níže uvedené tabulce.

Tabulka 6 - Parametry palivové mříže [11]

Název parametru	Hodnota	Jednotky
Počet instalovaných PS	127	ks
Vzdálenost mezi PS	288±0,2	mm
Délka absorpční trubky pro PS	4160	mm
Tloušťka stěny absorpčním trubky	4,2±0,3	mm
Vnitřní otvor absorpční trubky	242±1,5	mm
Tloušťka vrstvy mezi PS a absorpční trubkou	4	mm
Rozměry absorpční části	4350x2910x4245	mm
Hmotnost absorpční části sekce	≈ 21 000	kg
Rozměry nosné desky	4350x2910	mm
Hmotnost nosné desky	≈ 6000	kg
Celková hmotnost	≈ 29 000	kg

4.3 Záchyt PS

Záchytem palivového souboru rozumíme mechanické zařízení, které slouží k zachycení PS při jeho přemístění, inspekci a podobně. Toto komplexní zařízení bylo navrženo dle východní koncepce PS a je používáno v mírných úpravách na obou českých jaderných elektrárnách, jakožto i na mnoha dalších JE po celém světě. Zařízení je tvořeno dvěma hlavními částmi, vnější a vnitřní. Tyto části jsme schopni vůči sobě otáčet, čímž dochází k uzamčení a odemčení PS, tedy k záchytu a puštění. Tento proces probíhá prostřednictvím řídicího lana, které dokáže obě části vůči sobě pootočit. Lano je součástí každého záchytu a v našem případě je vedené spolu s lanem nosným, které nese záchyt spolu s PS, středem nosného spojovacího koridoru (NSK) až k manipulačnímu mostu. Na následujícím obrázku (Obrázek 18) je zjednodušeně naznačen princip záchytu PS.



Obrázek 18 – Princip záchytu PS (1 - záchyt PS, 2 - makety PS, 3 – nosná pera PS pro zamčení při záchytu, 4 - zachycený PS) [11]

Pro náš návrh jsme museli záchyt PS upravit kvůli aretaci v průběhu jeho vtahování a vysouvání do a z inspekčního bloku (inspekční klece). Původní záchyt PS je obroben tak, aby měl jeden stejný vnější průměr (jednoduchý válec).

Prvním řešením bylo vytvořit do válcového záchytu drážky, které budou sloužit pro vedení záchytu v inspekční kleci, následnými aretačními prvky. Vyšlo však najevo, že tato možnost je

neproveditelná z důvodu, že vnější průměr záchytu PS je menší, než největší průměr samotného PS.

Lepším řešením jsou drážky, které jsou navrženy tak, aby zapadaly do vodících části samotné inspekční klece. Tímto způsobem je záchyt PS veden (podrobnější popis viz níže). Tyto drážky mohou být na záchytu buď navařeny, anebo přímo frézovány z polotovaru při výrobě záchytu nového. Toto je pro úpravu záchytu řešení složitější, ale pro celkový návrh inspekčního bloku daleko jednodušší a proveditelnější. Na následujícím obrázku (Obrázek 19) je patrná úprava záchytu PS. [11]

Obrázek 19 - Záchyt PS (vlevo - původní, vpravo - upravený)

4.4 Nosný spojovací koridor (NSK)

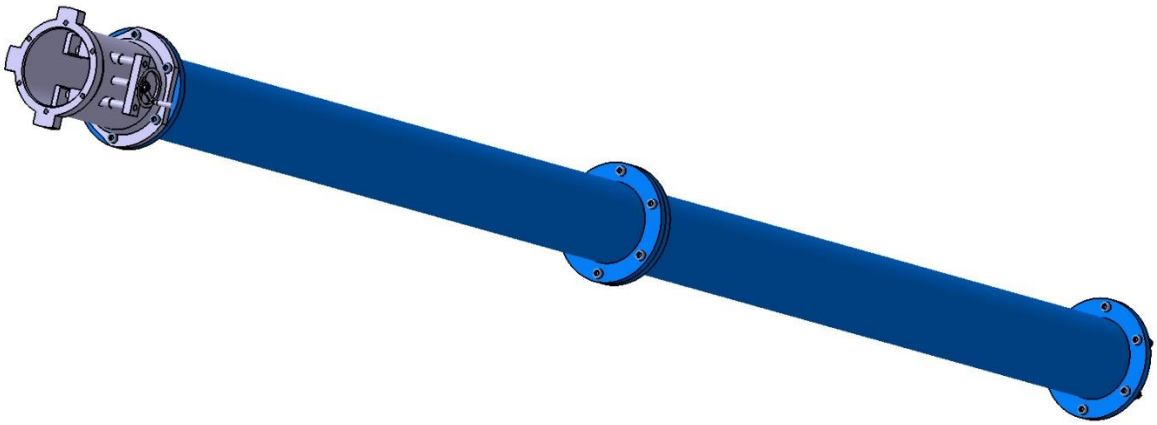
NSK je část inspekčního sloupu a zároveň zařízení N-SIO, která má za úkol plnit několik důležitých funkcí, a to zejména konstrukčních a funkčních. Tato část je nosnou konstrukcí mezi manipulačním mostem a inspekčním blokem. Má za úkol nést inspekční blok a zároveň tento blok přiblížit co nejvíce k mříži bazénu S5, ve které jsou umístěny vyhořelé PS. Pevnost tohoto NSK musí tedy splňovat několik požadavků:

- Pevnost v tahu směrem ke spodní částí bazénu S5 (musí být schopen bezpečně unést inspekční blok se všemi potřebnými měřicími, kontrolními a inspekčními zařízeními)
- Pevnost vůči vychylování a pružení vlivem proudícího chladiva (v bazénu S5 proudí chladivo ode dna vzhůru. Tento vodní proud nesmí být NSK rozkmitán)

- Dostatečná délka (délkou NSK určujeme přiblížení inspekčního bloku k mřížím bazénu S5 a zároveň určujeme částečně maximální výškovou úroveň, do které je možné vytáhnout vyhořelý PS, což je velmi podstatné z důvodu jaderné bezpečnosti a radiační ochrany)

Tímto koridorem také vedou dvě lana. První a hlavní středové lano nese záchyt PS a manipuluje se záchytem v ose inspekčního bloku nahoru a dolů. Druhé lano je od středu vychýlené, a má za úkol ovládat zamykání a odemykání záchytu PS. S jeho pomocí jsme schopni PS uchytit a také upustit. Obě tyto lana vedou středem nosného spojovacího koridoru.

Na Obrázku 20 je modrou barvou znázorněn nosný spojovací koridor. Šedá část je příruba spojující NSK s manipulačním mostem.



Obrázek 20 - Nosný spojovací koridor s hlavní spojovací přírubou MM

Jak je patrné z obrázku, tento NSK je tvořen dvěma trubkami, které jsou spojeny přírubou. Celková délka NSK je 4400 mm a jeho vnější průměr je 200 mm. Tato část zařízení je zároveň nejjednodušší částí inspekčního sloupu a výroba obnáší pouze navaření čtyř přírub na dvě dlouhé trubky a následně spojení trubek prostřednictvím přírub dohromady. Celý NSK je vyroben z austenitické oceli.

4.5 Inspekční blok

Inspekčním blokem (IB) rozumíme skelet, zahrnující konstrukční prvky a specifická zařízení, která jako celek slouží pro inspekci vyhořelých palivových souborů na obou výrobních blocích elektrárny Temelín, vždy na reaktorovém sálu v bazénu vyhořelého paliva v sekci 5 (S5). Tento inspekční blok zahrnuje aretační části inspekčního sloupu, které slouží pro vedení a uchycení PS před, po i během inspekce a manipulace s PS. Dále jsou jeho součástí senzory pro zjištění modelu PS pro určení zkrutu, průhybu a prodloužení, speciální kamery, navržené tak, aby zaznamenaly PS ze všech 6 stran, podpůrné systémy pro kontrolu přesnosti měření, např. teplotní senzory, nosnou

konstrukci pro všechna tato zařízení, pneumatické pohony pro použité senzory a aretační jehly ve spodní části IB, vedení senzorů a držení jednotlivých kamerových i podpůrných systémů a v neposlední řadě kabeláže.

Základní konstrukce IB je navržena tak, aby obklopovala PS pro určení jeho modelu alespoň ze tří stran v minimálně pěti místech po jeho výšce. IB tvoří jednotlivá inspekční patra. Tato patra jsou spojena jednotlivými úsekovými spoji, které jsou vždy natočeny tak, aby měla veškerá inspekční zařízení a jejich držení prostor pro svůj účel.

Klec IB je navržena v přesné toleranci v celé svojí délce. Jednotlivé prvky klece jsou spojeny osazenými šrouby, které zaručují přesné usazení. Jednotlivá patra jsou řezána laserem v přesné toleranci. Tolerance výroby a usazení by se měla pohybovat mezi 0,05 mm a 0,10 mm.

V úvahu byly brány tři typy nerezové oceli.

Nerezová ocel 1.4301 (chrom niklová austenitická nestabilizovaná)

- Nové značení dle ČSN 10088-1 1.4301 (X5CrNi 18-10)
- Legování: Cr 17 - 19,5 %, Ni 8 - 10,5%, C < 0,07%

Vlastnosti:

- Pevnost v tahu: Rm 520 - 720 N/mm^2
- Mez průtažnosti (kluzu): Rp 0,2 min. 210 N/mm^2
- Žíhací teplota: 1000 – 1100 °C

Nemagnetická, nekalitelná a má sklon ke zpevňování při tažení za studena, nebo při třískovém obrábění za nevhodných podmínek. Zpevnění vzniká přetvořením austenitu na deformační martenzit, který zvýší pevnost, sníží tažnost a způsobí magnetovatelnost. Tento deformační a zbytkový martenzit zle odstranit žíháním. Tyto změny nemají vliv ani na korozivzdornost, ani na svařitelnost. Ocel je korozivzdorná v prostředí běžného typu, tedy voda, slabé alkálie, slabé kyseliny, průmyslové a městské atmosféry. Náchylnost k mezikrystalické korozi při svařování (CrC vznikají již od 450 °C). V místě svárů o vrstvě větší než 5 mm je třeba svár žíhat. Ocel se nejčastěji zpracovává stříháním, ohýbáním, tažením. Třísková obrobitelnost je dobrá.

Nerezová ocel 1.4541 (chrom niklová austenitická stabilizovaná)

- Nové značení dle ČSN 10088-1 1.4541 (X6CrNiTi 18-10)
- Legování: Cr 17 - 19%, Ni 9 – 12%, Ti 0,4 – 0,7%, C < 0,07%

Vlastnosti:

- Pevnost v tahu: Rm 500 - 700 N/mm^2

- Mez průtažnosti (kluzu): Rp 0,2 min. 200 N/mm^2
- Žíhací teplota: 1000 – 1100 °C

Následné vlastnosti této oceli jsou shodné s předešlými. Náchylnost k mezikrystalické korozi při svařování až od 650 °C (CrC nevznikají díky přídavku Ti). Tato ocel je svařitelná i s většími průvary (nad 5 mm). Zpracována je stříháním, ohýbáním a tažením. Třísková obrobitelnost je dobrá.

Nerezová ocel 1.4307 (chrom niklová austenitická ocel s velmi nízkým obsahem uhlíku)

- Nové značení dle ČSN 17249 1.4307 (X2CrNi 18-9)

Vlastnosti:

Nerezová ocel je vhodná k hlubokému tažení a je určená pro expozice při velmi nízkých nebo zvýšených teplotách. Tato ocel je vhodná pro použití v agresivním prostředí, zejména pro prostředí s oxidační povahou (kyselina dusičná). Dále je tento typ nerezové oceli vhodný na díly a aparatury, které mají odolávat mezikrystalové korozi, vyžadují leštění na vysoký lesk a při výrobě vyžadují velmi hluboký tah. V agresivním prostředí je využitelnost této oceli omezena teplotou 350 °C. Ocel 1.4307 je odolná proti mezikrystalové korozi pouze v průběhu svařování, a to krátkodobě při dosažení ohřevu 500-700 °C. Dále je odolná proti silně oxidujícím kyselinám a nedochází tak k plošné korozi. Ocel je méně náchylná k nožové korozi. Proti oxidaci za zvýšených teplot na vzduchu je odolná do 850 °C, v páře do 750 °C a ve směsných plynech do 550°C. Nerezová ocel 1.4307 patří do typů oceli, které jsou velmi dobře svařitelné, a lze ji obrábět.

Pro náš návrh byla z těchto tří austenitických ocelí vybrána jedna. Touto ocelí je Nerezová ocel 1.4301. Tato ocel je dostupná (dodavatelé hutního průmyslu) a v prostorách kontrolovaného pásma a reaktoru je již dostatečně ověřena.

Veškeré šrouby, které jsou na inspekčním sloupu umístěny, byly vybrány dle normy ISO 3506. Tyto šrouby jsou také vyrobeny z austenitické oceli, tato má ale jiné pevnostní a chemické vlastnosti, než ocel 1.4301.

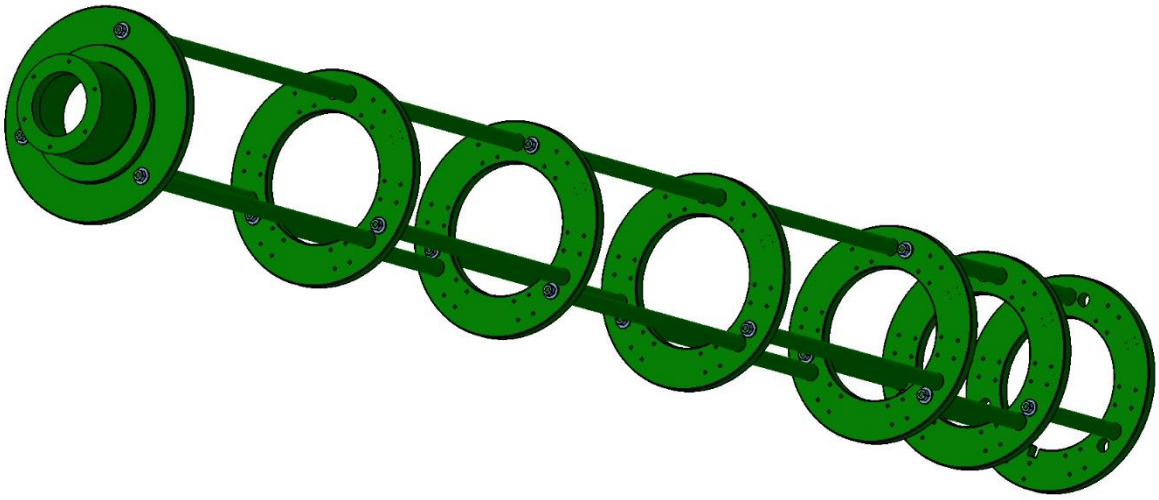
Abychom zvýšili kvalitu šroubového spoje, bude pod každou matku použita podložka od firmy Nord-lock, která má specifické funkční vlastnosti při dotahování a povolování daného šroubového spoje. Tato podložka je vidět na následujícím Obrázku 21.

Obrázek 21 - Podložka Nord-lock [27]

Pro šroubové a závitové spoje v tomto návrhu je také možné použít závitový zámek, který je znám jako Loctite 2432. Tento zámek se nanáší na povrch závitu před jeho dotažením. Výhodou tohoto zámku je, že je chemicky upravený (čistý), od prvků jako je Fluor, Chlor, Brom a Síra, které jsou v kontrolovaném pásmu a prostorách reaktorového bazénu nechtěné. [28]

4.5.1 **Klec IB**

Klecí inspekčního bloku (Obrázek 22) rozumíme sestavu mechanických celků, která bude sloužit jako nosná konstrukce pro veškeré inspekční prvky a jejich součásti. Těmito prvky jsou měřicí tanky nesoucí LVDT senzory, senzory teplot, aretační bloky, aretační tanky ve spodní části IB, inspekční kamery s osvětlením, mechanismus pro měření růstu PS, kabeláž a veškeré spojovací a upevňovací komponenty.

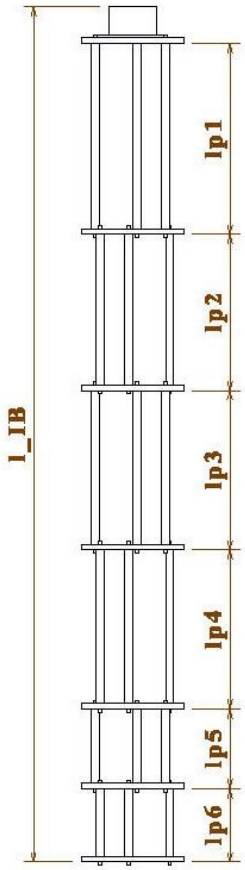


Obrázek 22 - Nosná klec inspekčního bloku

Tato sestava se skládá ze tří základních částí. Z pater, spojovacích tyčí a nosné, aretační příruby. Nosná aretační příruba spojuje klec IB s nosným spojovacím koridorem. Dále slouží jako referenční dosedací plocha pro záchyt PS. Její podrobnější účel je vysvětlený v podkapitole 5.6.2.

Klec IB je dále tvořena jednotlivými patry, které jsou rozmístěny vzhledem k výšce souboru tak, abychom byli schopni provádět inspekci v námi vybraných místech (Obrázek 23). Především

se bavíme o distančních mřížkách PS a spodní hraně PS. Jak je patrné z následujícího obrázku, součástí našeho navrženého IB je šest inspekčních nosných pater.



Obrázek 23 - Rozložení pater Klece IB po výšce

Úplně nahoře klece se nachází již zmíněná aretační příruba. Od té jsou dále rozmístěna jednotlivá patra. První patro, rozumějme od příruby směrem dolů, je vzdáleno o l*p1*. Následně jsou tři patra rozmístěna o stejnou vzdálenost, tedy *lp2 = lp3 = lp4*. Předposlední patro pak o vzdálenost *lp5* a poslední patro o vzdálenost *lp6*. Palivová kazeta nemá všechny distanční mřížky od sebe stejně vzdáleny a i proto jsou patra rozmístěna v různých odsazeních. Dalším důvodem je měření růstu PS a spodní aretace PS. Z tohoto důvodu je třeba dostat se až k patě PS a zde tyto úkony provést.

Všechna patra jsou řezána laserovou technologií a jejich vnější i vnitřní průměr je přesný a stejný. I díry jsou v jednotlivých patrech vrtány v přesné toleranci (díry pro upevnění veškerých inspekčních, aretačních i pomocných komponent). Stejně tak tloušťka pater zůstává u všech stejná.

Poslední základní částí klece IB jsou spojovací tyče. Tyto tyče jsou vyrobeny ze speciální válcované oceli a na svých koncích jsou ve vysoké přesnosti zasouvány do odlehčení, která jsou součástí každého patra. Tyto tyče mají na obou koncích závity, které procházejí skrz každé patro

a pevně je mechanicky spojují. Spojovacím komponentem na straně druhé je matice. Mezi každými dvěma patry jsou po 120° rozmístěny tři přesné spojovací tyče.

Patra klece IB, která jsou spojena prostřednictvím přesných spojovacích tyčí klece IB, tvoří celkovou tuhost samotné klece IB. Proto je potřeba provést základní pevnostní analýzy pro definovaný pohyb v určeném prostředí, abychom zaručili dostatečnou odolnost vůči vnějším vlivům a klec IB měla i dostatečnou životnost.

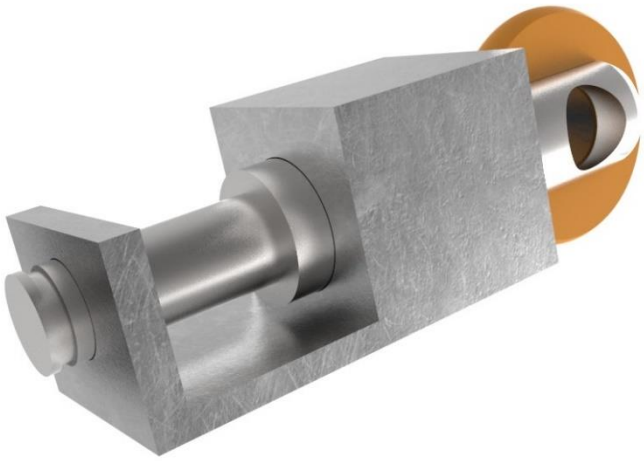
4.6 Aretace (vedení) záchytu PS

Aby mohla být přesně určena a naměřena geometrie palivového souboru vtaženého do inspekčního bloku, je nutné tento soubor aretovat. Aretace je nutná také při manipulaci se souborem při vtahování PS do IB a zasouvání PS zpět do bazénové mříže. PS je po zachycení v záchytu upevněn velmi přesně a nepohyblivě. Při této manipulaci nám tedy stačí aretovat pouze záchyt PS.

4.6.1 Aretace (vedení) záchytu PS při manipulaci

Vedení záchytu palivového souboru při manipulaci je velmi důležité zejména kvůli bezpečnosti. Jakýkoliv nenucený a nechtěný pohyb samotného souboru je nepřípustný. Pohyb souboru mimo vymezenou část a aretační dráhu ohrožuje jeho bezpečnost a hrozí jeho mechanické poškození. Toto poškození by mohlo ohrozit jak samotný manipulovaný PS, tak i soubory ostatní, které jsou v dané bazénové sekci umístěny. Nechtěné vniknutí jakékoliv pevné části do bazénové mříže, ať už je prázdná, či obsazená PS je nepřípustné.

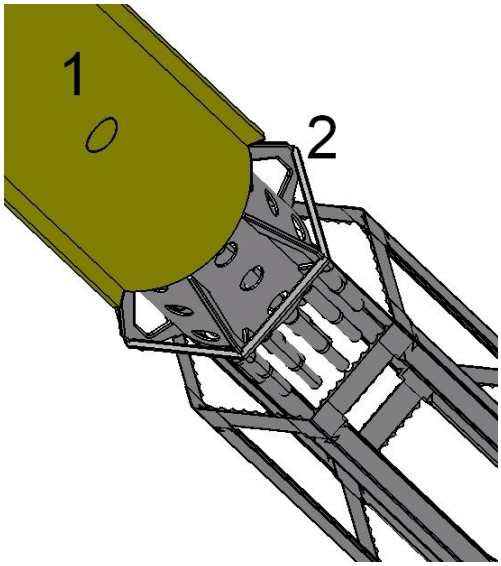
První variantou vedení záchytu PS bylo použití aretačních bloků, které měly samotnou aretaci mechanicky, pasivně provádět. Tyto bloky měly být upevněny na jednotlivá patra IB, vždy o 120° posunuta od sebe v ose PS. Na následujícím obrázku (Obrázek 24) je patrný zjednodušený aretační blok.



Obrázek 24 - Aretační blok pro vedení záchytu PS při manipulacích

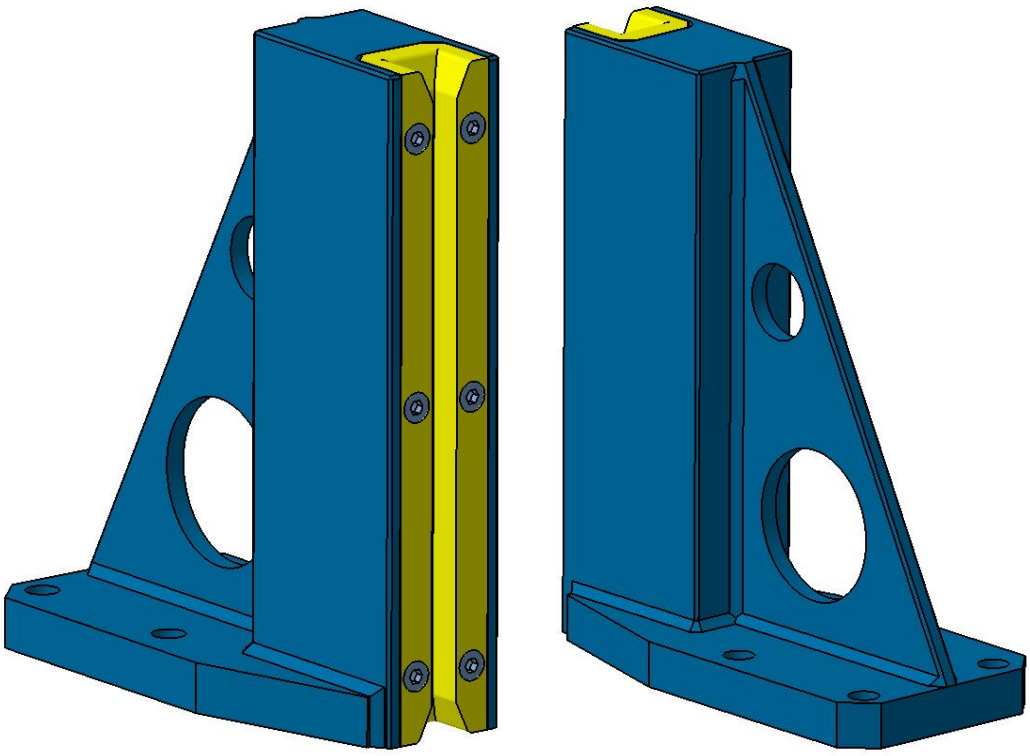
Tento aretační blok tvoří čtyři hlavní části. První částí je domek, ve kterém je umístěn pohyblivý píst. Tento píst je hned částí druhou a pohybuje se pomocí jednoduchého kluzného ložiska. V zúžené části tohoto hlavního pístu je pak pružina, která provádí onu pasivní mechanickou pohyblivost celého aretačního bloku. Na konci zúžené části je pak závlačka, která slouží k uzamčení pístu ze zadní strany. Ze přední strany je stejně tak píst zajištěn závlačkou. V přední části bloku je nekovové kolo, které slouží jako vodivý, dotykový element. Toto kolo je ložiskem upevněno na píst a prochází drážkou, která je součástí vedeného záchytu PS. V tomto záchytu byla vyfrézována oblouková drážka tak, aby odpovídala tvaru vodicího kolečka. Pokud by záchyt PS měl tyto drážky tři po celé svojí hlavní délce a tyto drážky byly od sebe posunuty o 120° bylo by možné záchyt tímto způsobem v průběhu manipulace aretovat.

Tento princip a návrh ale není proveditelný. Nejširší místo (Obrázek 25) zachyceného, neseného PS je v průměru větší, než nejširší místo samotného záchytu PS. Tato kolečka by se tedy plynule nedotýkala pouze záchytu, ale skákala by přes tento konstrukční prvek palivového souboru. Toto místo, které je zároveň nejširším rozměrem PS, je patrné z následujícího obrázku.



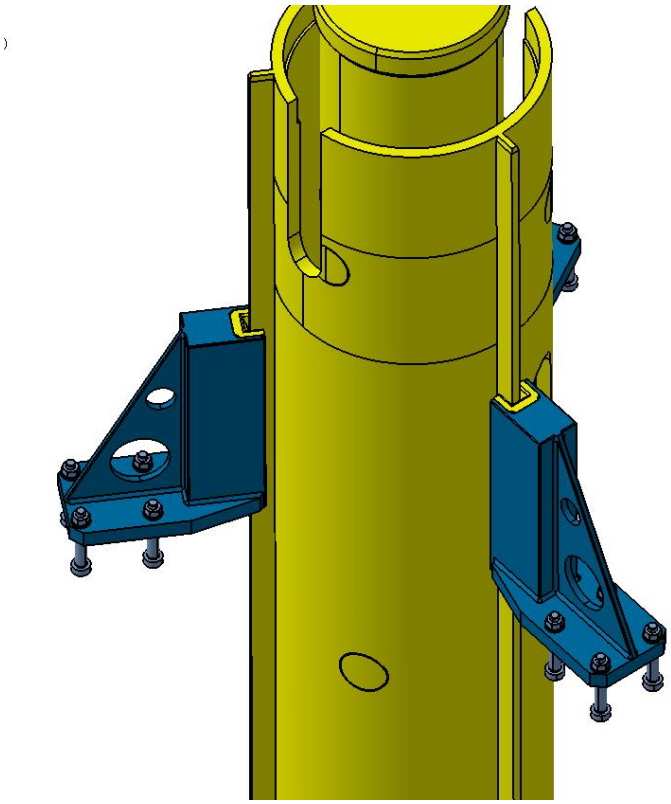
Obrázek 25 - Nejširší místo PS (1 - průměr záchytu PS, 2 - nejširší místo PS)

Další možností je použití aretačního bloku, který povede záchyt PS na opačném principu, jak tomu bylo u výše uvedeného řešení. Do záchytu se tedy nebude nic frézovat, ale naopak, navaří se profil (ližina), který bude sloužit jako soustava ploch, které budou vedeny v následujícím aretačním bloku (Obrázek 26), jež je řešením, které se uplatní v našem návrhu.



Obrázek 26 - Aretační blok pro vedení záchytu PS při manipulacích

Tento blok je umístěn v šesti patrech inspekčního bloku, na každém tomto patře jsou umístěny bloky tři, vždy po 120°. Aretace je tedy bezpečnější, než kdyby bylo použito pouze jednodrážkové, nebo dvoudrážkové vedení. Blok je vyroben z austenitické oceli 1.4301 a jeho výroba spočívá především ve frézování polotovaru o jeho základních rozměrech. Následně je aretační blok upevněn na jednotlivá patra vždy čtyřmi přesnými šrouby se zábrusem a zapuštěnou hlavou. Takto docílíme přesného usazení jednotlivých aretačních bloků na jednotlivá patra tak, aby byl záchyt PS veden pouze v jedné ose bez vychýlení. Záchyt musí být veden po celou dobu manipulace (zasouvání PS do IB a vysunování PS z IB). Tyto bloku musí být tedy rozměrově dimenzované a umístěné tak, aby při vyjíždění drážky záchytu PS z jedné skupiny aretačních bloků již drážka zasahovala a byla zajeta do další skupiny aretačních bloků v následujícím patře. Celková hmotnost jednoho takovéhoto aretačního bloku je 5,5 Kg. Na aretačním bloku jsou provedena odlehčení, která jsou patrná na předešlém obrázku. Obrázek 27 zachycuje princip aretačního bloku při najetém záchytu PS.



Obrázek 27 - Záchyt PS v aretačních blocích

Mezi protilehlými stěnami obou komponent (aretační blok a drážka záchytu PS) zůstává dostatečná vůle kvůli mechanické odolnosti a bezpečnosti. Nedojde tak k protilehlému zadření a opotřebení. Co se týče dotykových ploch aretace, tam je situace horší, neboť tyto plochy, ať už vnitřní plochy drážky aretačního bloku, nebo vnější stěny vodící navařené drážky na záchytu PS, budou mechanicky opotřebovány. Opotřebení je závislé na samotné přesnosti zhotovení tohoto návrhu, na degradaci materiálu radiací, což je zanedbatelné a také na mechanickém a cyklickém používání. Případná úprava záchytu PS je možná navařením a opětovným opracováním vodicí drážky. Aretační blok se jednoduše vymění za nový. Celý tento koncept je velmi jednoduchý a závislý pouze na přesnosti upevnění a zhotovení jednotlivých komponent.

Aretační bloky mají ve vodicí drážce kluzné pouzdro z materiálu IGLIDUR X (Žlutá vložka patrná z obrázku 26). Tento materiál je již pro tyto úkony ověřen. Tato kluzná pouzdra jsou nutná z toho důvodu, že pokud bychom zvolili dvě třecí plochy stejného materiálu, má tento dotyk sklon k zadírání. Záchyt PS je z austenitické oceli. IGLIDUR X jako vložka do aretačních bloků tento problém vyřeší.

Druhou možností vložky pro tyto bloky je termoplast KETRON PEEK 1000. Tento plast má dobré vlastnosti z pohledu tření a teplotní stálosti. Je také extrémně málo nasákavý a do prostor, ve kterých se inspekční sloup nachází, je velmi vhodný. [29]

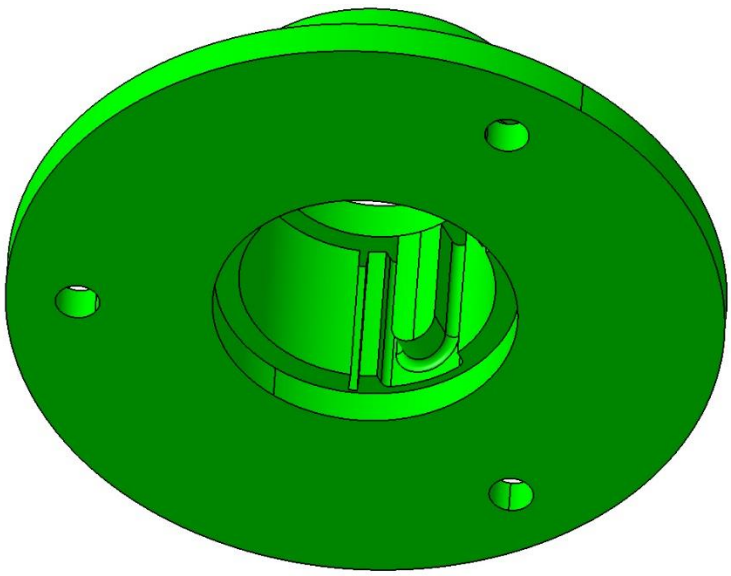
4.6.2 Aretace (vedení) záchytu PS a PS při inspekci

V průběhu inspekce je velmi důležité, aby byl palivový soubor vůči inspekčnímu bloku pevně fixován. To znamená, aby se PS vůči celému inspekčnímu sloupu nepohyboval. Tomuto fixování říkáme aretace PS v průběhu provádění inspekce a měření geometrie PS. Tyto úkony jsou měření průhybu PS, měření růstu PS, měření zkrutu PS. Toto měření bude z pohledu velikosti měřeného objektu velmi přesné a je tedy nutné, aby se měřicí čidla a senzory vůči měřenému objektu pohybovala co nejméně, ideálně vůbec.

Aretaci během inspekce budeme na našem zařízení provádět ve dvou místech. Prvním místem je nejvrchnější část inspekčního bloku a místem druhým je část nejnižší. V následujících dvou kapitolách je aretace v těchto dvou místech zvlášť popsána.

4.6.2.1 Aretace v horní části IB

Mezi nosným koridorem a inspekčním blokem je příruba (Obrázek 28), která má za úkol dvě základní věci: Pevné spojení obou těchto části inspekčního sloupu, které spojuje samotný IB se spojovacími koridorovými trubkami, která celý IB drží a přibližují ho bazénové mříži s palivovými soubory. Druhým úkolem této příruby je aretovat záchyt PS v jeho nejvyšší blokové poloze. Tato poloha se děje tehdy, pokud vtáhneme PS do inspekčního bloku do horní krajní polohy. Záchyt PS má v sobě v horní části zábrusy, které se zamknou do aretačních zámků, které jsou součástí této příruby. V krajní horní poloze záchyt PS dosedne na přesnou plochu příruby, od které je následně měřena vzdálenost pro určení růstu PS. Aby mohly drážky záchytu PS správně dosednout na aretační pera příruby, je nutné aretovat záchyt PS už v průběhu jeho vytahování nahoru středem IB. Tohle vedení je popsáno výše v kapitole aretace záchytu při manipulaci.



Obrázek 28 - Aretační příruba v horní části IB

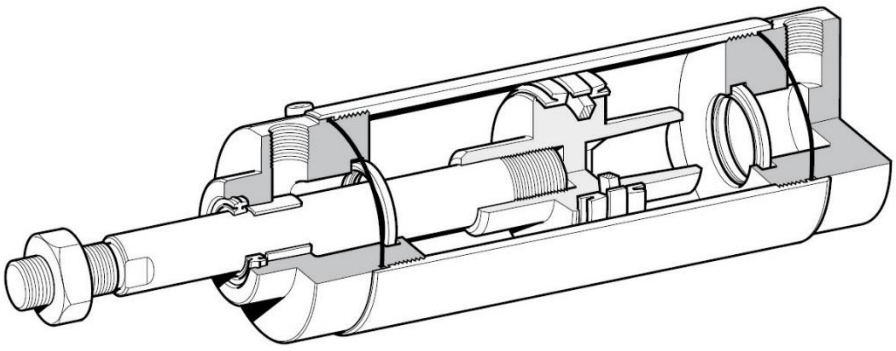
Aretace v horní části IB, provedena aretační a spojovací přírubou zajistí, aby se PS nepootočil v průběhu inspekce, aby byl pevně doražen ke vztažné ploše, od které je měřen růst, a aby byl celkově fixně upevněn ve své horní poloze.

V horní části stačí aretovat pouze samotný záchyt PS, protože PS je v záchytu uchycen pevně a je tímto „bajonetem“ aretován samostatně. Viz Kapitolu Záchyt PS.

4.6.2.2 Aretace ve spodní části IB

Po zajetí záchytu PS do aretační příruby je dále třeba fixovat spodní část PS v inspekčním bloku, aby nedocházelo k jeho houpání a pohybu vůči měřicím senzorům. Tato fixace probíhá v posledním patře IB pomocí pneumatických pístů (Obrázek 30).

V návrhu jsou použity jednočinné písty s pružinou od firmy PARKER (Obrázek 29). Stejné písty, které jsou použity například na měřicích tancích, nebo sestavě, která zajišťuje určení růstu PS.

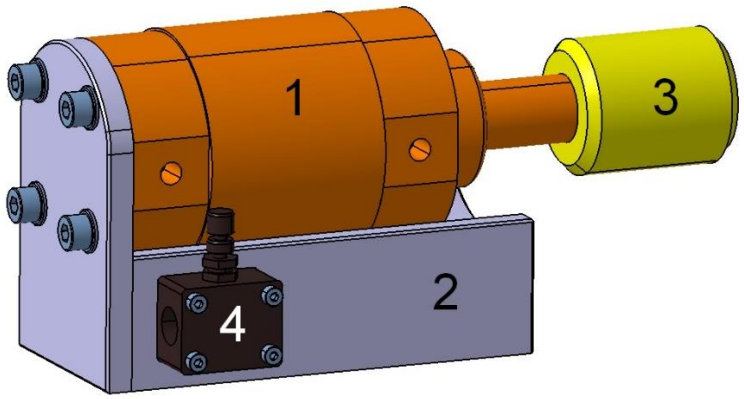


Obrázek 29 - Pneumatický píst P1S_D 080 x – 0025 [30]

Píst P1S_D 080 x – 0025 je upravený typ tohoto produktu od výše uvedené společnosti. Tento píst je robustní verzí těchto cylindrických pneumatických pohonů. Průměr jeho těla je 80 mm a pracuje na principu jednočinného zpětně podruženého pístu. Pokud je na píst přiveden vzduchový tlak, hřídel pístu je vysunuta tlakem ven. Vzdálenost, kterou tento píst popojíždí, jsme zvolili 25 mm. V případě, že dojde ke ztrátě tlaku, pružina zatlačí výsuvnou hřídel opět zpět do těla válce. V následující tabulce jsou uvedeny základní parametry použitých cylindrických pneumatických válců.

Tabulka 7 - Základní vlastnosti pístu P1S_D 080 x – 0025 [30]

Materiály	
Pístní tyč	Nerezová ocel DIN X 2 CrNiMo 17 13 2
Ložisko pístní tyče	Vícevrstevná ocel PtFe
Kryty konců	Nerezová ocel DIN X 5 CrNi 18 10
O-kroužek, interní	Nitrikaučuk NBR, FPM
Válec	Nerezová ocel DIN X 5 CrNi 18 10
Těsnění pístní tyče	FPM
Pístové ložisko	UHMWPE-plast
Pružina	Povrchově upravená ocel
Těsnící šroub	Nerezová ocel DIN X 10 CrNiS 18 9
Základní technické údaje	
Průměr válce	80 mm
Typ	Speciálně upravený
Vytažení pístu	25 mm
Teplotní zátěž	-20 °C to +80 °C.
Celková délka bez vytažení	86 mm
Závit pístu	M20x1,5 mm



Obrázek 30 – Aretační mechanismus ve spodní části IB (1 – Pneumatický píst, 2 – Podstavec, 3 – Aretační kostka, 4 – Škrticí ventil)

Na našem navrhovaném zařízení budou tyto aretační válce tři, vždy pootočené o 120 ° vůči sobě, což způsobí úplnou rotační i prostorovou aretaci, která zabrání spodní části PS, aby se mohla pohybovat vůči inspekčnímu bloku. Každý z těchto válců je usazen přesně na své nosné konstrukci, pevně fixován k IB. Jediná pohyblivá část vůči IB a PS je tedy hřídel, která se dotýká přes dotykovou kostku PS a tím ho aretuje. Touto dotykovou kostkou rozumíme přípravek upevněný na konec výsuvné hřídele. Přípravek je použit z důvodu hrozby mechanického poškození stěn PS. Abychom zamezili jakémukoliv poškození, musí být dotyková kostka z měkčího materiálu, než je samotný materiál stěny PS v tomto místě. Aretační kostka je patrná z Obrázku 28 a materiál, který na ni byl použit je již uvedený KETRON PEEK 1000.

5 NÁVRH A KONSTRUKCE INSPEKČNÍCH PRVKŮ

Inspekčními prvky rozumíme všechna taková zařízení a mechanismy, které slouží pro kompletní požadovaný rozsah inspekce palivového souboru (PS.)

Řídicí systém

Na MM jsou umístěny vzdálené vstupy, které jsou následně vedeny k samotnému PC systému, který je umístěn ve spodní části řídicího pultu. Ve střední části pultu jsou umístěny základní ovládací prvky zařízení.

Bezpečnostní systém

Bezpečnostní systém musí být a je oddělen od systému řídicího. Jeho funkcí je obstarat bezpečnostní funkce během pohybu zařízení a během samotné manipulace s PS. [3]

5.1 Měřicí systémy a mechanismy

Hlavní součástí tohoto systému jsou čidla, jejich převodníky na digitální signál a vyhodnocovací část. Tento systém také ukládá naměřená data a exportuje je v daném formátu pro další zpracování.

5.1.1 LVDT senzor LIPS 115

Jednou z možných variant pro zjištění geometrie PS byla tato LVDT čidla od společnosti POSITEK. Tato čidla se označují LIPS P115 a jde o lineární snímače polohy. Jsou určeny pro vědecké a průmyslové aplikace.

Snímač P115 LIPS (Obrázek 31) je těžkou verzí snímače P114. Tato verze byla hledána z hlediska dimenzování zařízení. Odolnější snímače jsou pro tento návrh podstatně lepší. Tento senzor je schopný pracovat ponořený do kapaliny i při tlaku 10 barů. Jednotka je kompaktní a prostorově efektivní. Reakce čidla je téměř po celé jeho délce. Toto čidlo také poskytuje lineární výstup svého posunutí. Každý snímač je kalibrován na požadavky zákazníka od 50 mm do 600 mm. Čidlo má také vnitřní integrovanou EMC ochranu. Snímač je velmi robustní, jeho tělo je z nerezové oceli. Z hlediska výkonu, opakovatelnosti měření a stability čidla jsou je schopen pracovat v širokém teplotním rozmezí. Senzor je snadno montovatelný s možností dokoupení nerezových ložisek s vnitřním závitem M8. V následující tabulce jsou uvedeny podrobné parametry snímačů. [12]

Obrázek 31 - Lineární snímač polohy LIPS P115 [12]

Specifikace vybraného snímače je uvedena v následující tabulce.

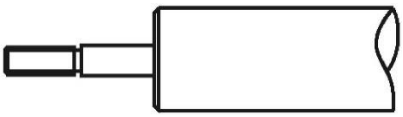
Tabulka 8 – Parametry snímače LIPS P115 [12]

Průměr těla snímače	35 mm
Délka těla (axiální verze)	166 mm
Délka těla (radiální verze)	189 mm
Možné prodloužení	7 - 12,65 mm
Linearita	< 0,25 % / 450 mm / 20 °C
Frekvenční závislost	> 10 kHz (-3 dB), > 300 Hz (-3 dB)
Provozní teplota	C až 125 °C° -40
Skladovací teplota	C až 125 °C° -40
Stupeň krytí	IP68 10 Bar
Rozsah měření	50 mm až 600 mm
Výstupní signál	0.5-4.5V DC
Vstupní signál	+5V DC nom. ± 0.5V
Napájení	4-20mA +24 V DC nom.
Možnost délky kabelu	50 cm a více

5.1.2 **LVDT senzor AML/IE**

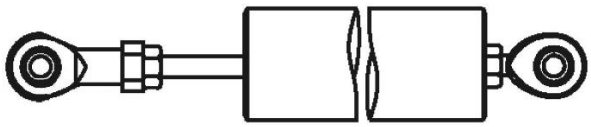
Dalším konkurenčním LVDT senzorem je AML/IE od společnosti APPLIED MEASUREMENTS LTD. Snímače AML/IE patří do série odolných snímačů používaných v nejtěžších průmyslových podmínkách. Tyto senzory mohou být napájeny střídavým, nebo i stejnosměrným napětím a jsou standardně utěsněny na IP65 s možností utěsnění na IP68 po domluvě s výrobcem. Tato čidla jsou vyrobena z nerezové oceli a jsou vybavena pevným kabelem se zapouzdřenou vývodkou. Jsou dodávána v několika konstrukčních variantách zakončení transformátorového měřícího jádra.

Na Obrázku 32 je patrná nejjednodušší a nejpoužívanější varianta zakončení jádra měřicího transformátoru u těchto senzorů a to zakončení rovné, válcové, tyčinkou. Toto zakončení není pro náš návrh příliš vhodné z důvodu, že při měření je nutné, aby celá ploška konce jádra dosedala na měřený povrch. V našem případě by se mohlo stát, že PS bude mít své distanční mřížky, na kterých bude prováděno měření, poškozené nebo zkroucené.



Obrázek 32 - LVDT senzor zakončený měřící tyčinkou [16]

Zakončení okem z obou stran je na Obrázku 33. Tento způsob je vhodný pro aplikace, kdy je třeba měřit z obou stran senzoru. Toto oko je průtažné a je tedy možné korigovat vysunutí měřicího jádra ze zadní strany LVDT senzoru. Pro náš případ měření je i tento způsob provedení nevhodný.



Obrázek 33 - LVDT senzor zakončený okem z obou stran [16]

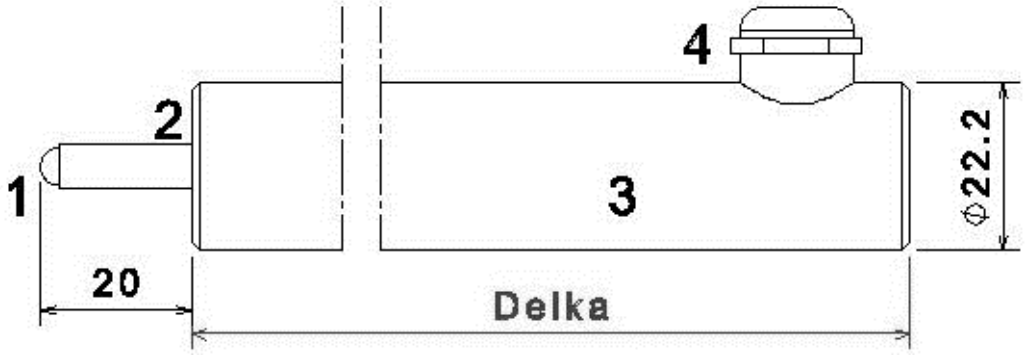
Jako nejvhodnější se jeví konstrukční řešení patrné z Obrázku 34, kdy je měřicí jádro transformátoru LVDT senzoru zakončeno přesnou kuličkou. Tato kulička je pro IB optimální variantou z hlediska kontaktu s PS. I v případě, že by na distančních mřížkách byla nerovnost, kulička nebude mít problém si s nerovností poradit.

Obrázek 34 - LVDT senzor zakončený kuličkou [16]

U senzoru, který bude na IB použit si dle výrobce, můžeme zvolit délku maximálního vysunutí jádra. Tyto délky jsou uvedeny v tabulce 9. Na Obrázku 35 je názorný případ LVDT senzoru s rozměry, který má jádro zasunuté. V takovémto případě je přesah měřicího jádra (tyčinky) 20 mm. Průměr tohoto typu senzoru je jednotný, 22,2 mm. [16]

Tabulka 9 - Volitelné rozměry u výrobce senzorů AML/IE [16]

Délka vytažení jádra	Celková délka jádra (LVDT)
mm	mm
±0.5	130
±2.5	140
±5	165
±10	180
±12.5	210
±15	225
±25	285
±50	370
±75	440
±100	440



Obrázek 35 - Základní rozměrové parametry LVDT senzoru (1 – kuličkové zakončení, 2 – měřící jádro, 3 – tělo LVDT senzoru, 4 – vývodka pro napájecí kabel) [16]

Přesnost těchto senzorů, co se týče lineárního posuvu, je velmi dobrá a výrobce uvádí až ±0.25 %. Pro náš návrh budou použita čidla, která budou mít stupeň krytí IP68, což odpovídá odolnosti až do 5 barů (hloubka 50 m pod hladinou). Tento produkt je schopný pracovat při teplotách od -30 °C do +85°C ve standardních případech (výjimečně od -30°C do +150 °C). Další vlastností tohoto senzoru je vývodka směrovaná axiálně vzhůru, což opět vyhovuje našemu návrhu.

Tabulka 10 - Materiálové vlastnosti [16]

Tělo	Nerezová ocel 1.4305 chromniklová austenitická nestabilizovaná
Prodlužovací tyčinka	Nerezová ocel 1.4305 chromniklová austenitická nestabilizovaná
Měřící jádro	Nerezová ocel 1.4005 martenzitická
Pružina	Nerezová ocel 1.4404 chromniklová austenitická nestabilizovaná molybdenová nízkouhlíkatá
Vývodka	Uhlíková ocel
Obal kabelu	Poniklovaná mosaz

Dodavatel k senzorům přikládá i kabeláž, která je trojí (Barvy níže uvedeného textu určují barevné rozlišení jednotlivých vodičů kabelového svazku):

- Střídavá verze (4 vodiče)

Primární +, primární -, sekundární +, sekundární -

- Stejnosměrná verze (3 vodiče) – (4-20mA, 0-5Vdc, 0-10Vdc, ±2.5Vdc))

Napájení, nulový vodič, signál

- Střídavá verze (6 vodičů)

Primární +, primární -, sekundární + (1), sekundární – (1), sekundární + (2), sekundární – (2)

Pro náš návrh byla vybrána čidla od společnosti APPLIED MEASUREMENTS LTD, protože konstrukčně i funkčně více vyhovují pro inspekci a měření PS. Dodavatel je spolehlivý a poskytuje velké množství materiálu i variant k těmto senzorům. Senzory jsou kompaktnější a kulička na konci měřícího trnu je pro náš návrh nejvhodnější. Cenově jsou tyto senzory srovnatelné. Jeden senzor stojí dle požadavků a rozsahu měření od 7 000 Kč výše. [16]

5.1.3 **Převodník signálu LVDT/AD**

Pro vybraný typ LVDT senzoru je třeba použít i vhodný převodník signálu. Firma APPLIED MEASUREMENTS LTD. nabízí k výše vybraným LVDT senzorům i tento universální převodník (Obrázek 36).

Obrázek 36 - Převodník signálu LVDT/AD [34]

Tento převodník se vyznačuje početnou škálou nabízených signálů.

- 0 – 5 V DC
- 0 – 10 V DC
- 4 – 20 mA
- 0 – 20 mA
- ± 5 V DC
- **± 10 V DC**

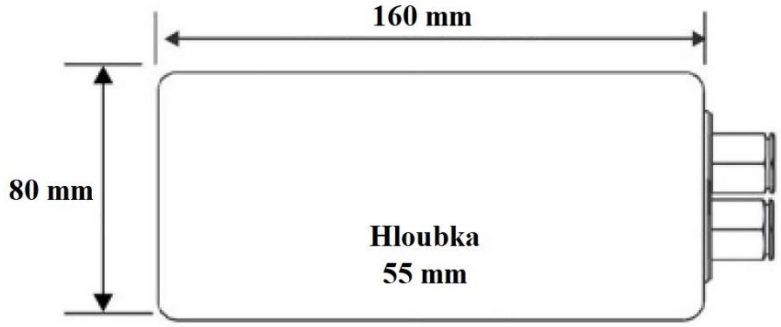
Ne všechny tyto typy signálů jsou vhodné pro navrhovaný IB. Inspekční blok je ponořen hluboko pod hladinou bazénu a bude vystaven silné radiaci. Ta působí především na vodicí cesty signálu a může tento signál ovlivňovat a zkreslovat. Na delší vzdálenosti je obecně lepší použít proudové signály, neboť jsou odolnější proti rušení. Napěťové signály mají větší rozlišení, než signály proudové, ale jsou citlivější na rušení. I přesto se jako optimální řešení ukázalo použití převodníku, který poskytuje výstup s největším napěťovým rozsahem ± 10 V DC. S touto variantou výstupu jsou v nabídce dva typy převodníku. Převodník LVDT/A, který je napájen střídavým napětím 110 - 230 V a převodník LVDT/D, který je napájen stejnosměrným napětím 24 V. Tento převodník excituje pro LVDT senzory střídavé napětí 4,5 V s frekvencí spínání v rozmezí 1 kHz – 5 kHz, je tedy vhodný i pro mnoho typů LVDT senzorů i od jiných výrobců. [34]

V následující tabulce jsou uvedeny přesnější parametry převodníku:

Tabulka 11 - Parametry převodníku [34]

	Minimální	Typické	Maximální
Napájení LVDT/A	99 - 198 V~	110 - 230 V~	126 - 253 V~
Napájení LVDT/D	18 V=	24 V=	28 V=
Proudové napájení	138 mA	145 mA	150 mA
Excitace	-	4,5 V RMS	-
Frekvence	1 kHz	-	5 kHz
Citlivost	20 mV	-	10 V
Provozní teplota	0 °C	-	50 °C
Skladovací teplota	20 °C	-	70 °C
Odolnost proti vlhkosti	max. 95 %		
Stupeň krytí	IP 65		

Převodník je kompaktní a jeho rozměry jsou patrné na následujícím Obrázku 37.



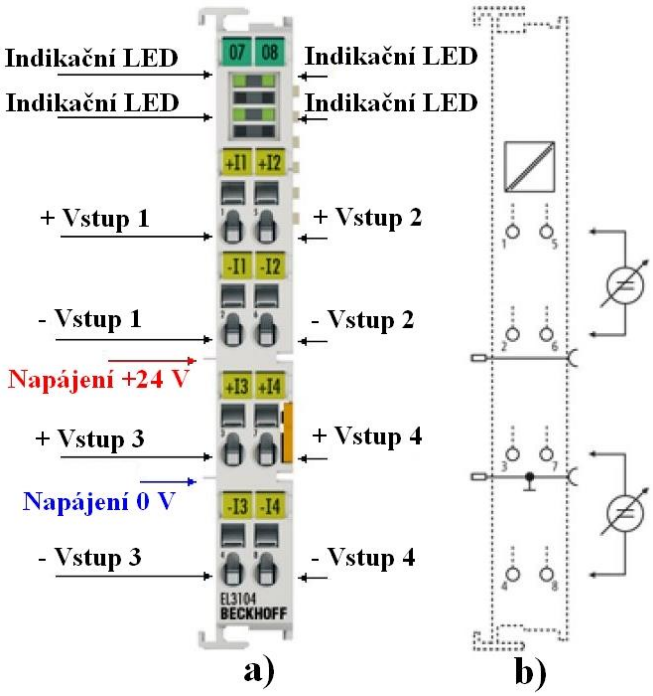
Obrázek 37 - Rozměry skříně převodníku LVDT/AD [34]

5.1.4 **Vstupní terminál**

Pro takzvaný měřicí řetězec, zahrnující LVDT senzor, převodník, a měřicí systém, je nutné zařadit vstupní kartu, nebo také terminál, který bude výstupní signál z LVDT senzorů po převodu přijímat.

K tomuto účelu slouží buď napěťová, nebo proudová analogová vstupní karta, terminál (Obrázek 38). Byla vybrána napěťová vstupní karta od firmy Bechoff. Analogová vstupní karta pro připojení přes napětí je použita následující. [32]

Analogová 4 – kanálová vstupní karta EL3104



Obrázek 38 – Analogová napěťová karta EL3104 ((a) - názorné schéma, (b) - elektrické schéma) [32]

Analogový vstup zpracovává signály v rozmezí mezi – 10 V a + 10 V, jak je již uvedeno. Napětí je digitalizováno na rozlišení 16 bitů a je přenášeno (elektricky izolované) na automatizační zařízení vyšší úrovně řídicího systému. Vstupní kanály terminálu EL3104 jsou diferenciální vstupy a následný stav signálu terminálu je indikován světelnými diodami. V následující tabulce jsou uvedeny podrobnější parametry.

Tabulka 12 - Parametry vstupní analogové karty EL3104 [32]

Počet vstupů	4 kanály
Zdroj napájení	přes E-bus
Napětí vstupního signálu	± 10 V
Vnitřní odpor	> 200 Ω
Vstupní frekvence	5 kHz
Společné napětí vůči GND	35 V max.
Doba konverze	≈ 100 µs
Rozlišení D-signálu	16 byte
Hmotnost	≈ 65 g
Provozní teplota	-25 až +60 °C
Skladovací teplota	-40 až +85 °C
Odolnost proti vlhkosti	95%
Třída krytí	IP20

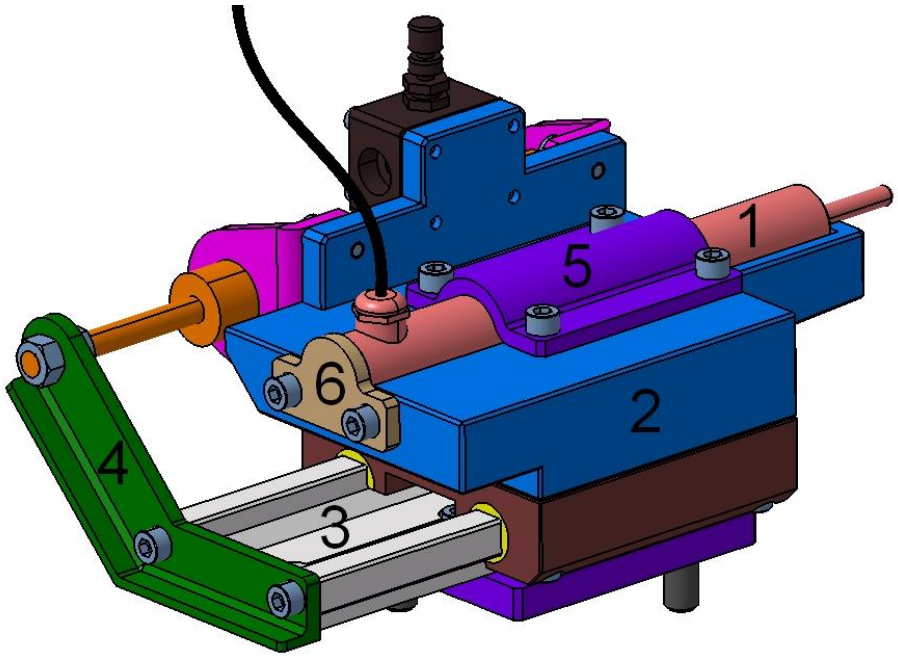
5.1.5 **Alternativní vyhodnocení signálu**

Pokud by se v našem řešení použilo výše uvedené schéma, tedy zapojení LVDT sonda, převodník a zobrazovač, měli bychom z tohoto řetězce digitální posuvné měřidlo. Hodnoty z těchto měřidel, z každého jednoho LVDT senzoru musel někdo opsat a následně vyhodnotit geometrii PS, kterou jsme tímto měřením zjistili. Jako alternativu tohoto měření je možné použít převodník, který má místo analogového výstupu přímo výstup digitální. Takovýmto řešením je například linka RS485, nebo sběrnice používané v automatizační technice Modbus, EtherCAT, Ethernet apod. Tímto by byl zrušen převod na analogový signál a jeho zpětná digitalizace vstupní analogovu kartou (terminálem). [33]

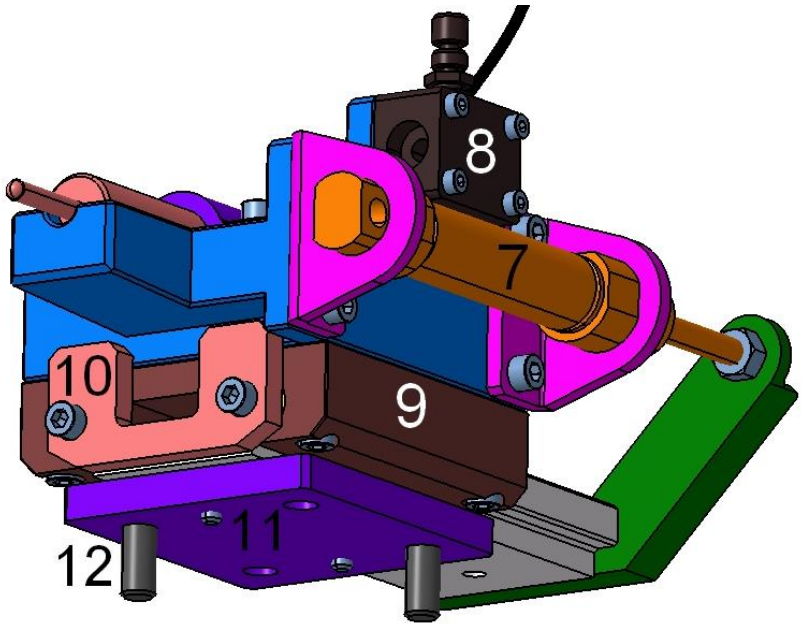
5.1.6 **Měřicí tank**

Měřicím tankem rozumíme zařízení, nebo lépe řečeno celek, který zajišťuje jako sestava přiblížení LVDT senzoru k palivovému souboru a je tedy prvkem, který ve výsledku určuje mechanicky geometrii PS.

Měřicí tanky zahrnují několik prvků, které jsou pro jejich správnou funkci nepostradatelné. V našem návrhu jsou dva druhy měřicích tanků. První typ je určen pro měření pouze průhybu PS, druhý typ je určen pro měření zkrutu. V následujících kapitolách jsou podrobněji popsány tyto dva typy použitých měřicích celků. Obrázek 39 a Obrázek 40 znázorňuje měřicí tank pro průhyb. Na něm jsou názorně označeny jednotlivé části měřicího tanku.



Obrázek 39 - Měřicí tank 1 (1 - LVDT senzor, 2 – Tělo měřicího tanku, 3 – Ližina, 4 – Zadní doraz, 5 – Upevňovací příruba, 6 – Usazení LVDT senzoru)



Obrázek 40 - Měřicí tank 2 (7 – Pneumatický píst, 8 – Škrticí ventil, 9 – Pojezdový domek s vložkami Iglidur X, 10 – Přední doraz, 11 – Mezi-vložka pro upevnění, 12 – Kolky pro zajištění)

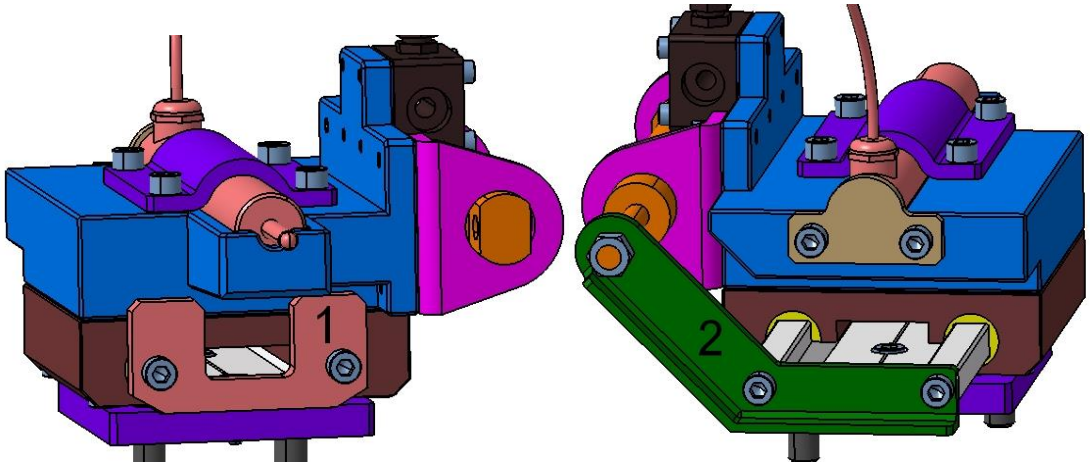
5.1.6.1 Měřicí tank pro určení ohybu

Tento měřicí celek je na inspekčním bloku užit celkem šestnáctkrát. Mechanicky určuje body v prostoru, které ve výsledku udávají geometrii palivového souboru důležitou pro kontrolu ohybu palivového souboru. Tento měřicí tank je tvořen z několika hlavních částí:

- LVDT senzor
- Lineární vedení
- Domek pro upevnění
- Pneumatický píst
- Škrticí ventil

LVDT senzor je podrobně popsaný v *kapitole LVDT senzor AML/IE*, znovu tedy není nutné tuto část měřicího tanku popisovat.

Lineární vedení je jedním ze základních prvků celé této měřicí sestavy. Je tvořeno čtyřmi hlavními částmi a spojovacími prvky. První částí je ližina. Ližina slouží jako profil, po kterém se povede podstava, na které už bude umístěn objekt, se kterým chceme lineárně posouvat. Další dvě části jsou mechanicky upevněny k této ližině a jsou to zadní a přední doraz. Přední doraz slouží k zajištění správné polohy přivezení LVDT senzoru k palivovému souboru. Slouží i jako bezpečnostní prvek a říká, kam až může podstava s objektem přijet. Zadní doraz pak vymezuje nejzazší zadní dojezd a je v něm upevněna přední vodící část pneumatického pojezdu (píst). Na následujícím obrázku (Obrázek 41) jsou tyto dorazy znázorněny.



Obrázek 41 - Měřicí tank (1 - Přední doraz, 2 - Zadní doraz)

Součástí lineárního vedení je dále posuvná plocha (Obrázek 42), která je pohybujícím se mechanickým prvkem po ližině. Tato posuvná plocha má obrácený profil odpovídající ližině s odolnými kluznými pouzdry (Na obrázku 41 (vpravo) jsou vidět vyznačeny žlutou barvou). Tato pouzdra jsou vyrobena ze speciálního materiálu nazvaného iglidur-X.

Pouzdro iglidur® X je definováno svou kombinací odolnosti proti vysokým teplotám s pevností v tlaku a současně s vysokou chemickou odolností. iglidur® X je navrženo pro vyšší rychlosti než ostatní pouzdra iglidur®. Základní vlastnosti:

- Odolnost vůči teplotám od -100 °C do +250 °C v trvalém provozu (krátkodobě až do +315 °C)
- všestranná chemická odolnost
- vysoká pevnost v tlaku
- velmi nízká absorpce vlhkosti
- vysoká odolnost proti opotřebení v celém teplotním rozsahu
- tlakové zatížení až 150 MPa
- lineární pohyb na nerezové oceli
- lineární pohyb za zvláště vysokých teplot [22]

Obrázek 42 - Posuvná plocha od společnosti IGUS s kluznými pouzdry Iglidur-X [22]

Další podstatnou částí měřicích tanků je pneumatický píst, který je pohonem tohoto měřícího celku. Jeho úkolem je dopravit po ližině domek s hlavním LVDT senzorem k měřenému objektu, kterým je v našem případě PS a následně přitáhnout celek zase zpět do bezpečné polohy. Bezpečné z toho důvodu, že pokud by se stalo, že měřicí tank zůstane v přední měřicí poloze a došlo by k manipulaci s PS, mohl by se PS poškodit. Proto je tento pohon vybaven vnitřní pružinou, která po uvolnění atmosférického tlaku v pístu opět přitáhne tank zpět do zadní pozice.

Pro tento návrh byl zvolen pneumatický cylindrický píst od firmy PARKER (Obrázek 43). Jde o sérii P1S s průměry od 10 do 125 mm podle normy ISO 6432 – 6431. Měřícímu tanku byl z této řady vybrán jednočinný, návratově odpružený píst s průměrem těla 25 mm. [30]

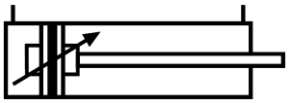
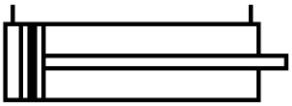
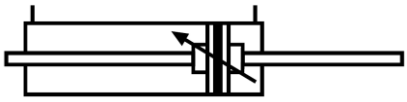
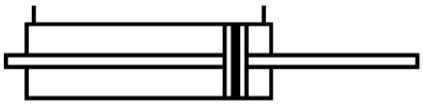
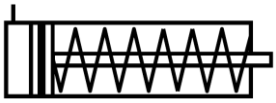
Obrázek 43 - Jednočinný odpružený pneumatický pohon P1S 025 S S 0025 [30]

P1S 025 S S 0025 je označení tohoto produktu, kde **P1S** udává řadu těchto cylindrických pohonů, **025** udává průměr těla v mm, první **S** znamená jednočinné, zpětně podpružené písty, druhé **S** znamená standardní rozsah teploty a **0025** je maximální možné vysunutí vnitřního pohonného pístu.

V Tabulce 13 jsou naznačeny rozdíly v jednotlivých funkčních provedeních.

Následující tabulka (Tabulka14) poukazuje na parametry pneumatického cylindrického válce P1S 025 S S 0025.

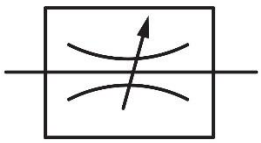
Tabulka 13 – Funkční provedení pneumatických pístů (žlutě označený je výše vybraný) [30]

Označení	Princip	Popis
M		Dvojčinný, nastavitelné odpružení
D		Dvojčinný, nenastavitelné odpružení
F		Dvojčinný, nastavitelné odpružení, přes tyč
K		Dvojčinný, nenastavitelné odpružení, přes tyč
S		**Jednočinný, pružinový návrat pro zatažení**
T		Jednočinný, pružinový návrat pro vytažení

Tabulka 14 - Základní technické a materiálové vlastnosti [30]

Materiály	
Pístní tyč	Nerezová ocel DIN X 10 CrNiS 18 9
Ložisko pístní tyče	Vícevrstevná ocel PtFe
Kryty konců	Eloxovaný hliník
O-kroužek, interní	Nitrikaučuk NBR
Válec	Nerezová ocel DIN X 5 CrNi 18 10
Držák magnetu	Termoplastický elastomer
Magnet	Plastově potažený magnetický materiál
Pružina	Povrchově upravená ocel
Tlumící šroub	Nerezová ocel DIN X 10 CrNiS 18 9
Základní technické údaje	
Průměr válce	25 mm
Typ	S
Vytažení pístu	25 mm
Teplotní zátěž	-20 °C to +80 °C.
Výška cylindru	26,8 mm
Šířka cylindru	26,8 mm
Celková délka bez vytažení	132 mm
Závit pístu	M10x1,25 mm

Pro tyto pneumatické pohony platí také následující předpoklady. Zatížení válce by mělo činit asi 50 % teoretické síly (normální zatížení). Nižší zatížení způsobuje vyšší rychlost a naopak. Velikost trubky je dána funkcí válce vrtání, požadovanou rychlostí a délka trubky mezi ventilem a válcem. Pokud chceme maximálně využít kapacitu ventilu a maximální rychlost, hadice by měla být vybrána tak, aby odpovídala omezenému průměru ventilu, aby potrubí neomezovalo tok.



Obrázek 44 - Schematická značka škrticího ventilu vzduchu [23]

Další částí měřicího tanku je škrticí ventil (Obrázek 44). Tento oboustranný ventil je zde určen především pro redukci rychlosti přívodu vzduchu do jednotlivých pneumatických pohonů tak, aby byla rychlost dostatečně pomalá pro bezpečnost palivové kazety. Pokud bychom použili pneumatické válce bez rychlosti posuvu, mohlo by se stát, že měřicí kulička LVDT senzorů bude do distančních mřížek přímo střílena příliš vysokou rychlostí. Tím by mohlo dojít k mechanickému poškození PS. Z toho důvodu jsme vybrali škrticí ventil V53 (Obrázek 45) od společnosti VSK Profi, s.r.o., která je jejím dodavatelem. [23]

Obrázek 45 - Škrticí ventil V53 [23]

Následující tabulka udává základní rozměry a technické parametry použitého škrticího ventilu.

Tabulka 15 - Základní parametry škrticího ventilu V53 [23]

Typ ventilu	Obousměrný (omezovač průtoku)
Tlakový rozsah	2 - 10 bar
Teplotní rozsah	0 °C - 60 °C
Závity	Paralelní: UNI - ISO 228/1, Metrické: ISO R / 262
Připojení hadice	Podle použitého vybavení
Tolerance pro hadici	Bez tolerance
Materiál těla	eloxovaný hliník
Materiál jehly	poniklovaná mosaz
Materiál těsnění	Nitrikaučuk (NBR)
Materiál pružiny	nerezová ocel
Celková délka	40 mm
Celková výška	67 mm
Celková šířka	22 mm

Na závěr je třeba seznámit se s poslední a nejmohutnější částí měřicího tanku, kterou je samotné tělo měřicího tanku. Toto tělo je připevněno na posuvnou plošku, která je pojezdná po ližině a slouží k upevnění veškerých pohonných, redukčních a měřicích komponent. V reálu to znamená, že na tělo měřícího tanku je upevněn měřící LVDT senzor, pneumatický cylindrický pohon a škrtící ventil. Tělo je tvořeno dvěma částmi. První část je mohutná a nosná pro již zmíněné tři prvky a druhá část je horní uzavření pro LVDT senzor.

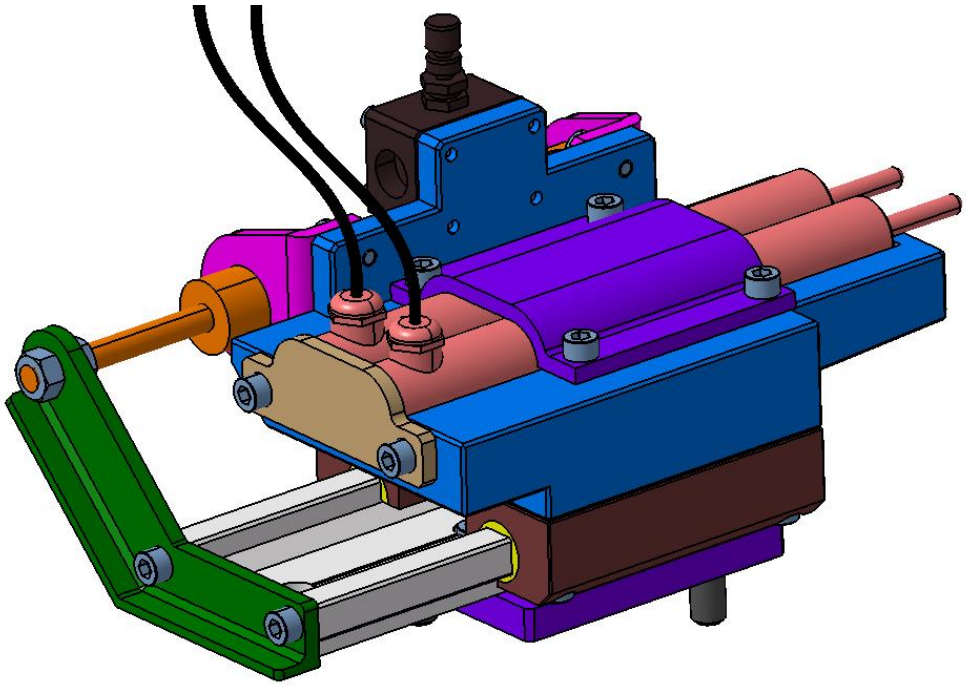
Jako celek je měřicí tank upevněn na jednotlivá patra inspekčního bloku celkem šestnáctkrát. V každém patře je měřicí tank umístěn vždy kolmo k distanční mřížce a vůči ose patra a PS jsou vůči sobě posunuty o 120 °. Na jednom patře jsou tedy upevněny vždy tři měřicí tanky. V prvním a posledním inspekčním patře jsou tyto typy měřicího tanku vždy jen po dvou. Je tomu tak z důvodu, že jsou tyto měřicí tanky nahrazeny měřicími tanky pro určení zkrutu.

5.1.6.2 Měřicí tank pro určení zkrutu

V prvním a posledním inspekčním patře s měřicími tanky jsou vždy jen dva měřicí tanky pro určení průhybu a jeden měřící tak pro určení zkrutu. Tento druhý typ měřícího tanku je tedy na celém IB umístěn pouze dvakrát. Jedná se o velmi podobný mechanismus měřicího tanku, jakým je měřicí tank pro určení průhybu. Jediným rozdílem v těchto dvou celcích je, že u těchto tanků jsou na jejich nosné části umístěny vždy dva LVDT senzory.

Abychom určili zkroucení distanční mřížky v tomto místě, potřebujeme dva body ležící vedle sebe na distanční mřížce. Pokud porovnáme úhlový rozdíl obou měřených úseček (první v horní části PS a druhou v dolní části PS), budeme schopni určit přesný zkut PS. Předpoklad k tomuto

měření a vyhodnocení je takový, že soubor bude zkroucený rovnoměrně v jednom směru od své hlavy ke své patě. Na následujícím obrázku (Obrázek 46) je vidět umístění dvou LVDT senzorů na měřicím tanku pro určení zkrutu.



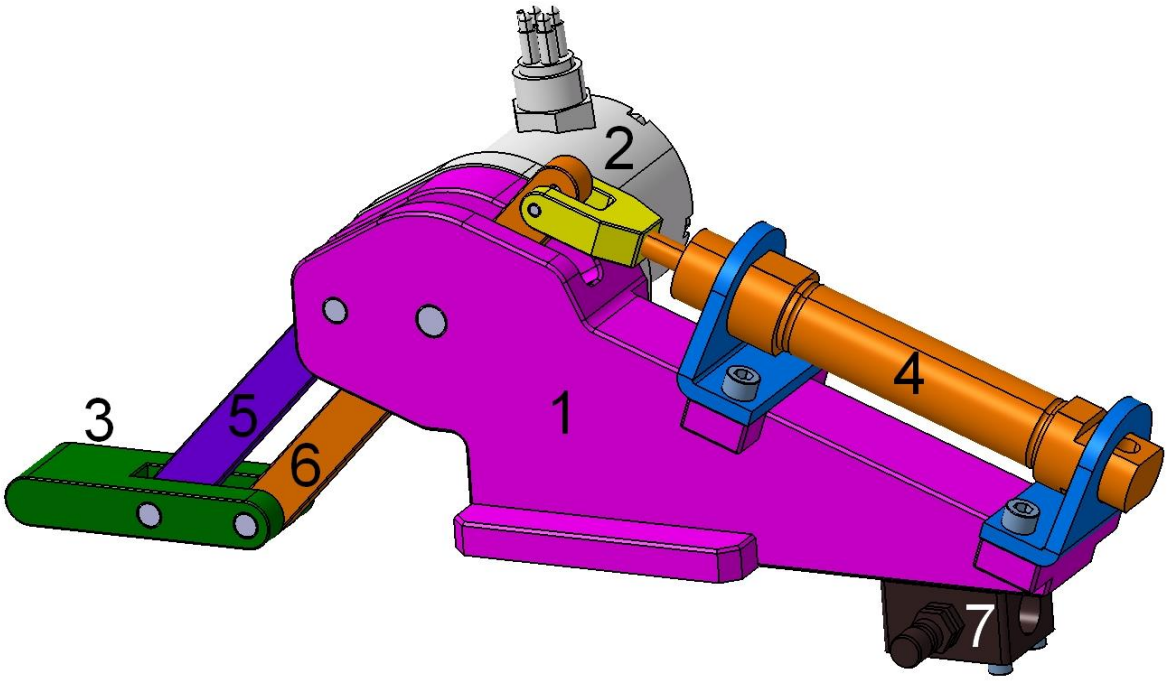
Obrázek 46 - Měřicí tank pro určení zkrutu PS

5.1.7 **Mechanismus pro určení růstu PS**

Tímto mechanismem rozumíme celek (Obrázek 47), který je schopný po určitém matematickém přepočtu fyzicky změřit velikost přírůstku, který na PS v průběhu jeho působení v AZ nastal. Základní úlohou tohoto zařízení (celku) je tedy určit přesnou výšku palivového souboru a to s přesností až ± 1 mm.

Toto měření je prováděno dotykovým mechanickým zařízením. Toto mechanické zařízení je sestaveným celkem, který sestává z následujících základních částí:

- Senzor natočení
- Pneumatický píst
- Tělo mechanismu pro určení růstu PS
- Manipulační rameno
- Pomocné rameno
- Měřící výložník
- Škrticí ventil



Obrázek 47 - Mechanismus pro určení růstu PS (1 – Tělo mechanismu, 2 – Senzor natočení, 3 – Měřicí výložník, 4 – Pneumatický píst, 5 – Pomocné rameno, 6 – Měřicí rameno, 7 – Škrticí ventil)

Senzorem natočení rozumíme elektrické zařízení, které je schopné zaznamenat změnu úhlu natočení. Pro tento návrh byl použit rotační indukční snímač polohy natočení S520 od společnosti POSITEK (Obrázek 48). Tento senzor je cenově dostupný, odolný a vysoce přesný rotační senzor pro náročné aplikace pod vodou.

Obrázek 48 - Rotační indukční snímač úhlu POSITEK S520 [31]

V následující tabulce jsou uvedeny přesnější technické parametry senzoru.

Tabulka 16 - Technické základní parametry senzoru S520 [31]

Rozsah měřeného úhlu	15 ° - 160 °
Průměr těla	60 mm (s přírubou 92 mm)
Délka těla	70 mm
Průměr snímací hřídele	6 mm
Délka snímací hřídele	15 mm
Přesnost měření úhlu	± 0,1 °
Stupeň krytí	IP68 (350 bar)
Provozní teplota	mínus 4 °C až 50 °C

Elektrické napájení je 12 mA (napěťová verze). Druhy výstupního signálu jsou pak různé. 0,5 V až 4,5 V DC, ± 5 V DC, ± 10 V DC, 0,5 až 9,5 V DC, 4 až 20 mA. Každému druhu výstupního signálu pak odpovídá jednoznačné zatížení (výstupní impedance).

Konektor pro připojení je 4 kolíkový BH-4-M konektor. [31]

Tento senzor je umístěn a jeho vlastní přírubou přišroubován na tělo mechanismu pro určení růstu PS. Na tělo jsou dále upevněny ostatní komponenty. Tělo je následně přišroubováno k poslednímu patru IB tak, aby bylo možné určit růst PS prostřednictvím spodní hrany PS.

Senzor natočení je osově spojen s manipulačním ramenem, toto rameno je součástí celého mechanismu a je u něj zjišťován úhel natočení vůči ose kolmé na osu PS. Toto rameno je zároveň prvkem, který slouží jako klika pro manipulaci. Pokud za tuto kliku zatáhneme, obě ramena se spolu s měřicím výložníkem dotknou spodní hrany PS. V této poloze je odečten měřený úhel, jehož prostřednictvím se pak dopočítá celková výška PS.

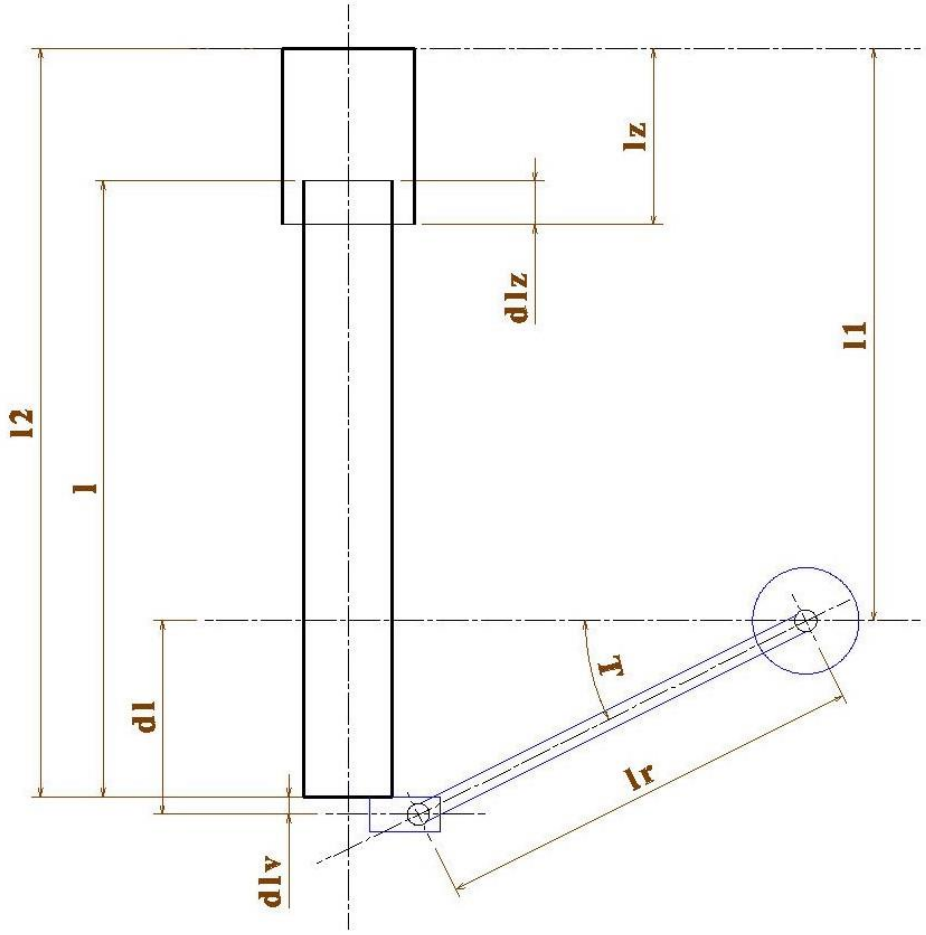
Na konci tohoto prvku je pohyblivým spojem usazen měřicí výložník, jehož úkolem je dotknout se spodní části PS a zajistit tak polohu pro odečtení úhlu natočení měřicího ramene.

Měřicímu ramenu rovnoběžně sousedí rameno pomocné.

Pohonem, kterým za manipulační rameno taháme, nebo ho vracíme do původní polohy je pneumatický píst do společnosti PARKER. Jde o stejný typ pístu, který je umístěn na měřicích tancích. Jediný rozdíl je v tom, že tento píst je typu T podle Tabulky 12. Maximální výsun hřídele je 50 mm a při tomto výsuvu pohon drží měřící výložník zasunut od spodní hrany souboru.

5.1.8 **Výpočet celkové výšky PS**

Při známém změřeném úhlu T jsme schopni (při znalosti ostatních konstantních rozměrů) dopočítat přesnou celkovou výšku PS. Všechny potřebné rozměry jsou vyznačeny na Obrázku 49.



Obrázek 49 - Schematické vyznačení rozměrů pro dopočet skutečné výšky PS

Následující vztahy popisují matematický výpočet konečné výšky PS.

$$l = l_2 - l_z + d_{lz} \quad (1.1)$$

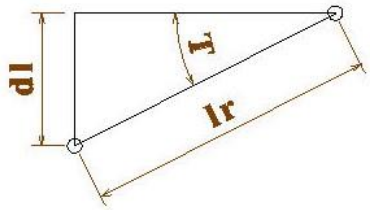
$$l_2 = l_1 + d_l - d_{lv} \quad (1.2)$$

Kde l je celková měřená výška PS, l_2 je výška břemene spolu se záchytem PS, l_z je výška záchytu PS, d_{lz} je výška zapuštění PS v záchytu PS při manipulaci, $l l_1$ je vzdálenost osy senzoru od dosedací horní plochy aretační příruby, d_l je vzdálenost osy senzoru od osy dotykového výložníku a d_{lv} je vzdálenost osy dotykového výložníku od spodní hrany PS.

Dosazením za *l2* dostaneme následující vztah:

$$l = l_2 + d_l - d_{lv} - l_z + d_{lz} \quad (1.3)$$

Na následujícím Obrázku 50 je graficky znázorněn přepočet úhlu T na vzdálenost osy senzoru od osy dotykového výložníku d_l.



Obrázek 50 - Grafické znázornění pro přepočet měřeného úhlu na vzdálenost

Níže uvedený matematický vztah popisuje základní goniometrický přepočet úhlu T na d_l.

$$d_l = \sin(T) \cdot l_r \qquad (1.4)$$

Kde T je úhlem natočení měřicího ramene dotykového výložníku a l_r je délka měřicího ramene.

Dosazením vztahu (1.4) do upraveného vztahu (1.3) dostáváme výslednou rovnici pro výpočet celkové výšky PS.

$$l = l_1 + \sin(T) \cdot l_r - d_{lv} - l_z + d_{lz} \qquad (1.5)$$

5.1.9 **Teplotní snímače FIEDLER**

Inspekční sloup, který je touto prací navrhován, bude při svém provozu trvale ponořen do chladiva bazénu. Tímto chladivem je voda s obsahem bóru, který potlačuje štěpnou řetězovou reakci vyhořelých palivových souborů umístěných v tomto bazénu. Rozměry a délka samotné inspekční klece, která slouží jako místo pro provádění inspekce a měření geometrie na PS je natolik velká, že při zjišťování a měření růstu PS je nutno počítat s nezanedbatelnou teplotní dilatací v jednotlivých výškách od hladiny. Abychom byli schopni přesně změřit růst palivového souboru, je třeba znát teplotu v jednotlivých úrovních samotného inspekčního bloku, Ze známých teplot a výšky PS spolu se záchytem PS od aretační příruby bloku, jsme schopni určit přesnou výšku souboru i při rozdílných teplotách v prostředí proudícího chladiva bazénu.

Pro měření v jednotlivých patrech IB byly vybrány dva typy teplotních senzorů. Oba jsou od společnosti FIEDLER, zabývající se výrobou přístrojů pro sledování kvalitativních i kvantitativních parametrů vody, např. hladinoměry, teplotní senzory, průtokoměry, pH-metry, oxymetry, konduktometry apod.

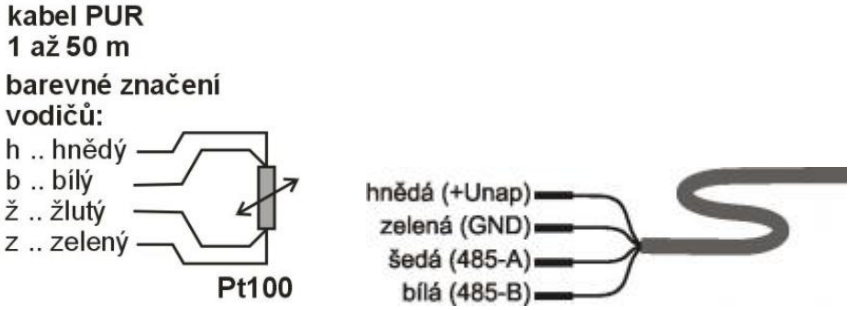
5.1.10 **FIEDLER Pt100-XM**

Tento odporový snímač teploty (Obrázek 51) patří mezi hojně používaná teplotní čidla s celkovou stabilitou, spolehlivostí, odolností a hlavně přesností měření. Tento snímač používá čidla Pt100 s třídou přesností A od předního výrobce RTD snímačů, firmy Hayashidenko.

Obrázek 51 - Odporový teplotní snímač Pt100-XM [19]

Konstrukce tohoto čidla a jeho výhoda spočívá v nanesení tenké vrstvy platiny na keramický substrát. Tato vrstva je fotolitograficky strukturována a pomocí laseru je odpor snímače přesně nastaven na hodnotu 100 Ohmů při teplotě 0 °C. Aktivní vrstva je pasivována izolační vrstvou, která chrání senzor proti vnějšímu chemickému a mechanickému poškození. Vývody vlastního snímače jsou z pozlaceného niklu. Keramická destička teplotního čidla má rozměry pouhých 2,0 mm x 5,0 mm x 1,0 mm. Z důvodu mechanické odolnosti je čidlo spolu s kabelovým napojením zapouzdřeno do nerezového pláště. Malé rozměry vlastního čidla dovolují konstrukci dalších speciálních snímačů s velmi krátkou časovou konstantou - například pro botanické a jiné podobné aplikace. V následujících bodech jsou uvedeny základní vlastnosti:

- Třída přesnosti A
- Universální čtyř vodičově zapojení
- Robustní nerezové pouzdro dvou velikostí
- Polyuretanový přívodní kabel 3,2 mm s délkou od 0,5 m do 50 m (Obrázek 52)



Obrázek 52 - Zapojení přívodního kabelu k senzoru [19]

- Přímé připojení k převodníku TEP06
- Vysoká přesnost měření (až 0,001 °C) [19]

Následující tabulka uvádí podrobnější technické parametry senzoru:

Tabulka 17 - Technické parametry odporového teplotního čidla Pt100-XM [19]

Třída přesnosti	A dle IEC60751:2008
Tolerance	0,15+0,002·t °C
Teplotní koeficient	0,003851
Teplotní rozsah	- 50 až 120 °C
Rozměry čidla	2,0 x 5,0 x 1,0 mm
Dovolený měřící proud	< 1 mA
Dlouhodobá stabilita	< 0,02 °C (200 °C a 1000 hod)
Materiál těla snímače	nerezová ocel 316L
Rozměry snímače	Průměr/délka - 6/37 mm (malý) - 10/110 mm (velký)
Třída krytí	IP68
Připojení	Čtyř-žílový PUR kabel

5.1.11 **Měřicí převodník TEP06**

Tento převodník je vhodný pro měření až 6 teplot pomocí výše uvedených odporových teplotních senzorů Pt100-XM a je pro ně také přímo určen. Snímače Pt100-XM mohou být i s požadovanými délky kabelů pevně spojeny s převodníkem TEP06 (Obrázek 53) a přímo takto dodány zákazníkovi, popřípadě si je může zákazník za požádání sám připojit pomocí svorek, které jsou součástí převodníku. Celý převodník je pevně zalit do ochranné polyuretanové hmoty. V tomto případě je tedy možné celý převodník provozovat celkově a stále ponořený ve vodě. Maximální délka jednoho kabelu k jednotlivému senzoru je omezena na 100 m. Senzory jsou k tomuto převodníku připojeny čtyřmi vodiči, délka kabelu do 100 m nemá tedy na přesnost měření žádný vliv.

Obrázek 53 - Převodník TEP06 pro odporové teplotní senzory Pt100-XM [20]

Obecné příklady použití převodníku jsou následující:

- Přesná měření teploty vody v různých hloubkách
- Přesná měření teploty půd

- Přesná měření více teplot v meteorologických stanicích
- Přesná měření v rámci výzkumných a vývojových projektů
- Měření teplot ve stavebnictví
- Měření teplot v průmyslových aplikacích

Tento převodník ve výsledku musí komunikovat s připojenou záznamovou jednotkou po sběrnici RS485 pod protokolem FINET. Po stejném kabelu je převodník i napájen. Záznamovou jednotkou mohou být následně označená zařízení od stejnojmenné firmy FIEDLER:

- Malá telemetrická stanice GSM Datalogger HYDRO LOGGER H1
- Universální registrační a řídicí jednotka M4016-G
- Malá telemetrická stanice GSM Datalogger STELA-3

Převodníky TEP06 i TEP06/S se vyznačují velmi vysokou přesností měření. Chyba měření v rozsahu od -30°C do +50°C nepřesahuje 0,1°C. Této přesnosti bylo dosaženo používáním teplotních čidel Pt100 třídy A a unikátním zapojením měřií elektroniky v těle převodníku, kde je každé měření opřeno o velmi stabilní rezistor s teplotním driftem pouhých 5 ppm (na vyžádání lze modul osadit referenčním rezistorem s Tk < 1 ppm).

K vysoké přesnosti přispívá i programové vybavení převodníku, které obsahuje číslicový filtr. Ten eliminuje případná šumem zatížená jednotlivá měření a provádí průměrování.

Protože přenos dat z TEP06, do připojené záznamové jednotky M4016, H1, nebo STELA-3 probíhá číslicově po sběrnici RS485, nemůže již připojená jednotka nijak zkreslit naměřené hodnoty teploty.

Obvyklé nastavení rozlišení při měření teploty bývá 0,1 °C (jedno desetinné místo). Je-li požadována vyšší citlivost měření, lze archivované kanály ukládat s rozlišením na 2 až 3 desetinná místa (0,01°C nebo 0,001°C). [20]

Následující tabulka upřesňuje parametry měřícího převodníku:

Tabulka 18 - Parametry měřícího převodníku TEP06 [20]

Počet měřicích vstupů	6 kanálů
Maximální délka ke snímači	100 m
Měřící rozsah	-50 °C až +100 °C (na vyžádání až +500 °C)
Rozlišení teploty	0,001 °C
Výstup	sériová sběrnice RS485
Komunikační protokoly	Modbus RTU a FINET
Rozsah nastavitelných adres	2 až 250
Doba měření jednoho kanálu	< 0,3 sek
Průměr výstupního kabelu	4 mm
Mechanické rozměry	90 x 60 x 25 mm
Hmotnost bez kabelů a čidel	350 g
Materiál	ABS, PUR
Pracovní teplota	-40 až +70 °C
Třída krytí	IP68

5.1.12 **FIEDLER TEP1/H**

Tento přesný převodník teploty s čidlem Pt100 je druhou navrhovanou variantou zařízení, pro zjišťování teploty v předem určených úrovních našeho inspekčního bloku. Je to zařízení z řady TEP1, která nabízí tři základní typy provedení převodník teploty s čidlem v jednom. První variantou je TEP1/K, který je určen pro měření teploty vzduchu, dále pak TEP1/E, který je určen pro samotné měření povrchové teploty a konečně TEP/H (Obrázek 54), často používaný pro měření teploty vody. Elektronika sondy je včetně teplotního čidla Pt100 a výstupního kabelu kompletně zalitá do voděvzdorné PUR hmoty. Sondu je možno zavěsit nebo jinak upevnit do požadované hloubky pod vodní hladinu (Obrázek 55). Velmi odolné mechanické provedení má za následek větší tepelnou setrvačnost sondy, která dosahuje až desítek sec. Aby i v tomto případě byla teplotní setrvačnost sondy přijatelná, je senzor umístěn těsně pod povrchem zalévací hmoty na konci sondy.

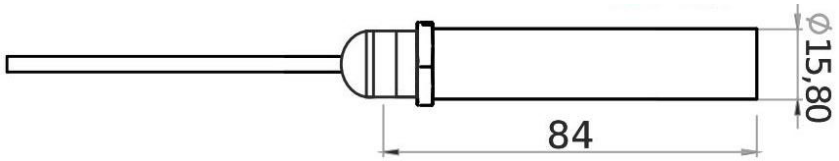
Obrázek 54 - Ponorný snímač teploty s odporovým čidlem TEP1/H [21]

Protože je tentokrát odporové čidlo spojené přímo v jednom s převodníkem teploty, není třeba používat k tomuto zařízení žádný další externí převodník, jako tomu bylo v předešlém případě u čidla Pt100-XM.

Na druhou stranu ale stejně tak, jako u předešlého čidla je třeba zajistit komunikaci přes připojenou záznamovou jednotkou po sběrnici RS485 pod protokolem FINET. Stejným kabelem je převodník napájen. Pro tento konkrétní typ lze použít výše uvedené záznamové a řídicí jednotky HYDRO LOGGER H1, M4016-G a STELA-3.

V následujících bodech jsou uvedeny základní vlastnosti:

- Vysoká přesnost měření teploty (±0,1 °C)
- Nízká teplotní závislost převodu (5 ppm)
- Rozlišení teploty až 0,001 °C
- Ponorné provedení TEP1/H s pevně vyvedeným kabelem
- Čtení měřených teplot přes RS485 na vzdálenost až 500 m
- Komunikační protokoly FINET nebo Modbus RTU [21]

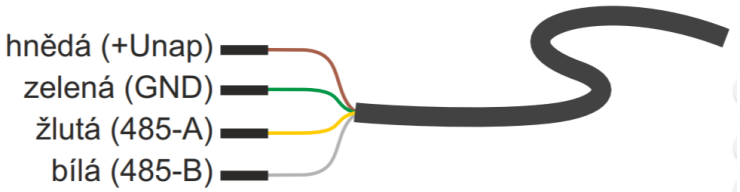


Obrázek 55 - Profilové znázornění a základní rozměry TEP1/H [21]

V následující tabulce jsou uvedeny podrobnější technické parametry tohoto zařízení:

Tabulka 19 - Technické parametry převodníku teploty s čidlem TEP1/H [21]

Počet měřících vstupů	1 kanál
Maximální délka ke snímači	100 m
Měřící rozsah	-50 °C až +100 °C (na vyžádání až +500 °C)
Rozlišení teploty	0,001 °C
Výstup	sériová sběrnice RS485
Komunikační protokoly	Modbus RTU a FINET
Rozsah nastavitelných adres	2 až 240
Napájecí napětí	6 až 16 V DC
Proudový odběr	< 5 mA
Mechanické rozměry	Průměr/délka - 16 mm / 90-110 mm
Hmotnost bez kabelů a čidel	80 g
Materiál	ABS, PUR
Pracovní teplota	-40 až +70 °C
Třída krytí	IP68
Výstupní kabel	4 žilový PUR kabel 1 až 100 m



Obrázek 56 - Zapojení PUR kabelu převodníku s čidlem TEP1/H [21]

Pro současný návrh inspekčního bloku byly vybrány teplotní senzory FIEDLER Pt100-XM, které jsou sice pasivní, bez integrovaného převodníku, ale jejich životnost i odolnost je větší a lepší v porovnání s jinými uvažovanými senzory. V následující tabulce je patrný rozdíl v nákladech na teplotní snímače pro náš návrh.

Tabulka 20 - Cenový rozdíl v obou variantách teplotních čidel pro IB

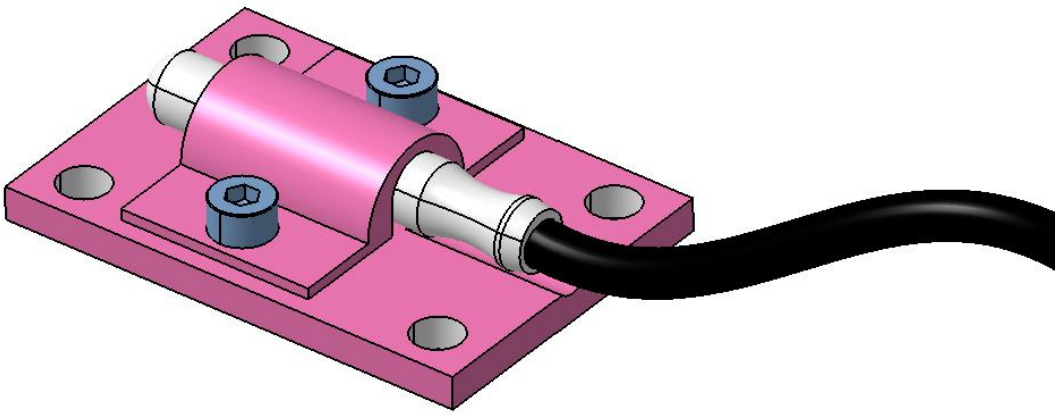
	Cena (1 ks)	Cena celkem pro IB	**Cena celkem pro IB (součet)**
Varianta 1			
Teplotní snímač Pt100-XM	470 Kč	2 350 Kč	**8 500 Kč**
Měřicí převodník TEP06	4 650 Kč	4 650 Kč	
Kabel, cena za 1 m	25 Kč	1 500 Kč	
Varianta 2			
Teplotní snímač + převodník TEP1/H	2 380 Kč	11 900 Kč	**13 900 Kč**
Kabel, cena za 1 m	25 Kč	2 000 Kč	

Jak je z předešlého cenového přehledu patrné, využití teplotních snímačů Pt100-XM spolu s převodníkem TEP06 je pro náš návrh přijatelnější. Tato varianta bude stát asi 8500 Kč, kdežto varianta snímačů se zabudovaným převodníkem by vyšla až na 13900 Kč.

Co se týče umístění vybraných teplotních senzorů na IB, budou uloženy a přichyceny v jednotlivých patrech v celkovém počtu 5 senzorů. Z těchto senzorů budou vedeny napájecí kabely, které povedou do převodníku, který bude umístěn v horní části inspekčního sloupu.

Jednotlivé senzory budou na patrech IB upevněny na hliníkové destičce s obloukovým přidržením (Obrázek 57).

Návrh řešení přepočtu růstu PS s uvažováním rozdílných teplot po délce souboru není součástí této práce.



Obrázek 57 - Upevnění a držení teplotního senzoru Pt100-XM

5.2 Kamerový systém

Tento systém je koncipován jako samostatný a je zcela oddělen od ostatních. Jediná spolupráce spočívá se systémem řídícím, který mu předává informace o poloze kontrolovaného PS. Skládá se z následujících částí:

- Iradiační kamery
- Osvětlení, které je potřebné pro kvalitní kamerové zachycení.
- Řídicí jednotka kamer.
- Řídicí jednotka osvětlení
- Samostatný ovládací panel kamer a osvětlení.
- Přístroj (PC) pro uložení a zpracování dat. [3]

Pro kontrolu stavu použitého jaderného paliva jsou zde popsány a následně porovnány dva kamerové systémy.

5.2.1 **Inspekční kamera VT XLRAD PT**

Tento produkt (Obrázek 58) je kamera vysoce odolná proti záření s vestavěným osvětlením od společnosti VISATEC a DEKRA company.

Obrázek 58 - Iradiační kamera XLRAD s LED diodami [18]

Funkce kamery:

- Vysoká odolnost proti ionizujícímu záření
- Technologie fotoaparátu s vysokým rozlišením pro detailní a přesné snímky
- Uživatelsky nenáročné
- Objektiv s protihnědnoucím sklem
- Kompaktní osvětlení buď v podání led diod, nebo halogenového světla
- Tlakové, vodotěsné pouzdro

Aplikace kamery:

- Inspekce palivových souborů
- Opravy palivových souborů
- Kontrola vnitřní části reaktorové nádoby
- Kontroly a inspekce kontejnerů na ozářené palivo
- Dálkově ovládané manipulátory
- Monitorování provozních procesů a výměna paliva [18]

V následující tabulce jsou uvedeny podrobné parametry a popis tohoto kamerového zařízení.

Tabulka 21 - Parametry a popis kamerového systému VT XLRAD PT [18]

Kamerový set	
Obrazový snímač	Vidicon 2/3"
Video výstup	FBAS (černobílý)
Rozlišení	460 řádků (horizontální)
Systém optiky	Motorizovaný 3 x zoom (8-24 mm) nebo objektiv f = 9 mm
Ostření	Motorizované
Osvětlení	LED diody 4x20W nebo 4x35 W halogenové reflektory s vyzařovacím úhlem 100°
Rozsah otočení	360° kontinuální s kodérem zpětné vazby polohy
Rozsah náklonu	220° se snímačem zpětné vazby polohy
Kodér zpětné vazby	Pro zobrazení rozsahu otočení a náklonu na řídícím pracovišti
Pohon	DC motor s posuvnou spojkou
Rozměry	L x W x H - 310 x 135 x 115 mm
Hmotnost	5,15 Kg
Provozní teplota	0 - 50 °C
Přípustný tlak	0,5 MPa
Radiační odolnost	2,5 x 10^6 rad/h (25 kGy/h) - celková dávka 2,5 x 10^8 rad/h (2,5 MGy)
Příslušenství	
Generátor	S integrovanými údaji o poloze OSD pro interní a externí senzory
Mokab VT72 MKT	Motorový naviják s nekonečně nastavitelnou rychlostí posuvu a se systémem brzd
Tyč	D - 29 mm s kvalitními nerezovými spojkami
Nahrávací zařízení	Různí výrobci
Zobrazovací zařízení	Různí výrobci
Řídící jednotka VT 300	
Napájení	220 V (AC) nebo 110 V (AC)
Rozměry	19´´/3 SHU zapouzdřeno
Konektorové rozhraní	Napájení / dálkové ovládání / kamerový vstup / video výstup / externí senzory
Hmotnost	16,5 Kg
Naviják kabelu VT 72 SKT	
Délka kabelu	50 m
Průměr kabelu	9,7 mm
Materiál	Potažení PU s Kevlarovým ochranným potahem
Konektorové rozhraní	MIL s vysoce kvalitním nerezovým pláštěm
Cívka	Kovový rám s navíjecími kroužky

Výrobce dodává ke každé kameře k dizpozici tři základní komponenty. Cívku, upevňovací tyč a řidicí jednotku (Obrázek 59).

Obrázek 59 - Příslušenství kamerového systému XLARD (vlevo - Řídící jednotka, uprostřed - Navíjecí cívka s kabelem, vpravo - tyč) [18]

5.2.2 **Inspekční kamera IST-REES R981/C981**

Tento produkt (Obrázek 60) je kamera vysoce odolná proti záření s vestavěným osvětlením od společnosti MIRION TECHNOLOGIES.

Tato firma je světovým moderním dodavatelem zobrazovacích prostředků pro jaderný průmysl. Je významným dodavatelem komponent pro monitorování procesů pro jaderné elektrárny a zařízení pro nakládání s jadernými odpady. Nové bezpečnostní požadavky týkající se prodlužování životnosti jaderných elektráren a výstavby elektráren nových vyžadují používání televizních, zobrazovacích systémů k nepřetržitému sledování strojů a klíčových oblastí v sekundárním pásmu. Kamerová řada R981 / C981 byla navržena tak, aby vyhovovala těmto požadavkům.

Obrázek 60 - Iradiační kamera IST-REES [17]

Funkce zařízení:

- Rotace, sklon, zoom a napájení přes tři kroucené páry
- Telemetrie odolná vůči radiaci
- Jeden 19‘‘ sub-rack pro ovládání až 8 kamer
- 8 - kanálové podsvícení pro osvětlení a mikrofon
- Řízení podsystémů RS-485
- Software a hardware jsou dimenzovány až na 128 kanálů kamer a osvětlení
- Seizmická kvalifikace kamer
- Modulární konstrukce pro snadnou montáž
- Jednoduché kabelové vedení [17]

V následující tabulce jsou uvedeny podrobné parametry a popis tohoto kamerového zařízení.

Tabulka 22 – Parametry a popis kamerového systému IST-REES [17]

Kamera	
Materiál	Nerezová ocel
Provozní teplota	0 - 55 °C (Chalnicon) a 0 - 40 °C (Vidicon)
Radiační odolnost	1 kGy/h (Chalnicon) and 30 kGy (Vidicon)
Stupeň krytí	IP68
Max. provozní ponoření	20 m
Max. dovolené ponoření	60 m
Konektor fotoaparátu	24 - cestný
Kabelové spojení	18 - cestný
Rychlost manipulace	6°/sek
Rozměry	H x W x D - 294 x 267 x 241 (320) mm
Hmotnost	13 Kg
8 kanálový systémový sub-rack	
Nominální napájení	100 - 120 / 200 - 240 V (50/60 Hz)
Provozní rozsah	85 - 132 / 170 - 264 V (47 - 440 Hz)
Výkon	150 VA
Délka kabelu	max. 300 m
Provozní teploty	0 - 50 °C
Povolená vlhkost	20 - 75 %
Rozměry	H x W X D - 134 x 483 x 300 mm
Hmotnost	7 Kg

Pro fyzický návrh našeho inspekčního bloku byl vybrán kamerový systém VT XLRAD PT. Tento systém má jednodušší provedení celkového kamerového systému, což je jedním z hlavních důvodů při rozhodování o výběru z výše uvedených dvou systémů. Kamera s pohony a osvětlením vyhovuje a splňuje všechny základní požadavky na kamerový a osvětlovací systém, použitý

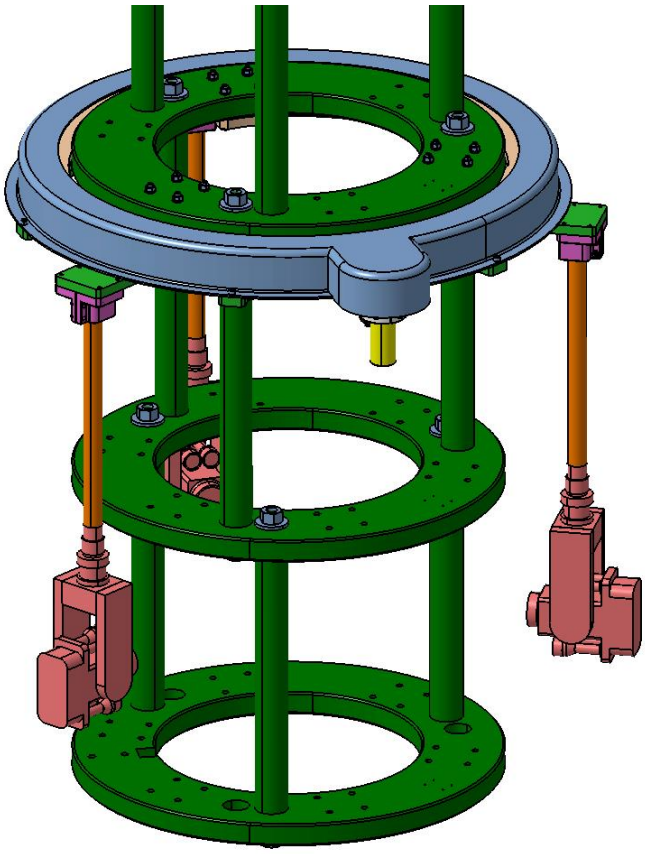
v tomto návrhu. Vybraná kamera váží pouze 5,15 kg, což je téměř třetina hmotnosti druhého systému. I tato mechanická skutečnost zjednoduší montáž i provedení samotného inspekčního celku. Radiační odolnost je dostatečná a tyto kamery jsou firmou ŠKODA JS a.s., odzkoušeny v elektrárenském provozu. Teplotní odolnost, stupeň krytí a tlakové zkoušky tohoto systému jsou také dostačující pro náš návrh. Kamera je pohyblivá jak horizontálně, tak i vertikálně. Na našem návrhu inspekčního bloku jsou tyto kamery umístěny dle požadavků pro inspekci tři. Jsou vůči sobě posunuty o 120° kolem palivového souboru a jsou schopny se v jednom směru otočit vůči ose PS o 60° tak, aby bylo možné zachytit i zbylé tři stěny šestihranného palivového souboru, na kterém bude inspekce prováděna.

5.2.2.1 Umístění kamerového systému na inspekční blok

Dle požadavků projektu musejí být na IB umístěny tři kamery, pořizující videozáznam, popřípadě fotografický záznam palivového souboru. Dále je nutné, jak již bylo zmíněno, aby byly kamery pohyblivé tak, aby bylo možné zaznamenat všechny stěny PS.

Při vtahování PS do IB a vysouvání PS z IB se palivový soubor nemůže pootočit, neboť je pevně uchycen v záchytu PS. Tento záchyt je následně aretován po celou dobu manipulace s PS. Právě vsouvání a vysouvání palivové kazety využíváme k tomu, abychom zaznamenali všechny stěny PS. Při vtahování PS do inspekčního bloku kamery zaznamenají první tři stěny a těsně před vysouváním PS zpět do své původní polohy v bazénové mříži, se kamery pootočí minimálně o 60°. V této poloze pak mohou zaznamenat zbylé tři stěny šestihranné palivové kazety. V návrhu je kamerám umožněn pohyb ± 90° kolem palivového souboru. Kamery jsou také schopny se naklánět dolů a do stran, což zvyšuje dále jejich schopnost zaznamenávat různé pohledové situace.

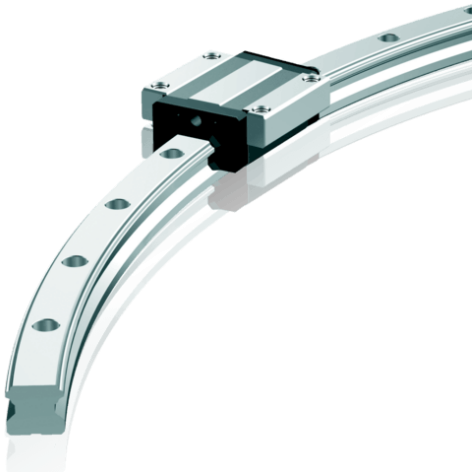
Tyto inspekční kamery jsou umístěny ve třetím patře IB. Upevnění těchto prvků bude řešeno několika kruhovými prvky, které obklopují PS.



Obrázek 61 – Umístění kamerového systému na IB

Prvním tímto prvkem je nosný ozubený disk. Tento disk je pevně přišroubován k patru IB a na jeho vnějším průměru jsou zuby. Jde tedy o ozubené kolo, které slouží jako pevná část posuvného mechanismu, co se rotace týče. Jeho součástí jsou také dorazy pro otočení kamer. V našem návrhu jsou dorazy rozmístěny tak, aby byl rotační pohyb kamer umožněn ± 90°.

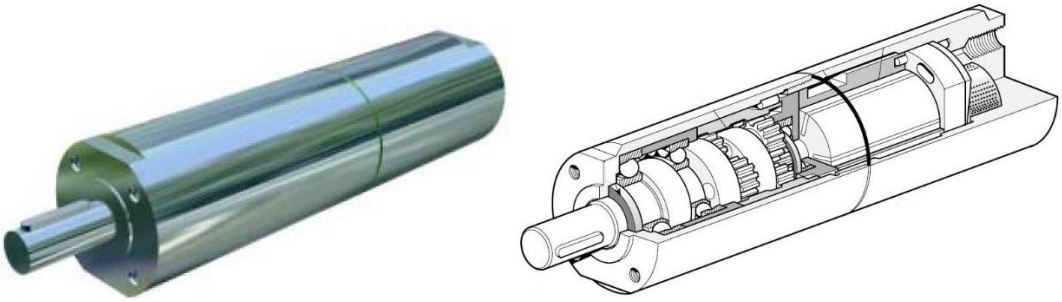
Zespodu je na tomto nosném ozubené disku upevněna šrouby kolejnice, která slouží jako kluzný prvek (Obrázek 62). Tato kolejnice je vyrobena na míru od společnosti HENNLICH, která se zabývá právě posuvem i v kruhové geometrii. [35]



Obrázek 62 - Kruhová kluzná kolejnice s domkem. [35]

K zmíněné kolejnici také patří domek, který se po ní kluzně posouvá. Materiálem, který je v přímém kontaktu s touto kovovou kolejnicí, je opět IglidurX. Těchto domků je na tomto mechanismu umístěno celkem 6 a na jejich nosnou část je připevněna další část, nosný kamerový disk, jehož úkolem je nést jednotlivé kamery, dále také pneumatický motor s ozubeným kolem a kryt celého mechanismu. Tento disk je, spolu s domky umístěných na kolejnici, pohyblivou, rotující částí.

Na tomto nosném kamerovým disku je upevněn přípravek, který nese pneumatický motor od společnosti PARKER. Motor s označením P1V-S020 má na své hřídeli nalisované ozubené kolo, které tvoří spolu s ozubeným nosným diskem soustrojí, díky kterému je možný rotační pohyb. Pro náš návrh je použit obousměrný pneumatický motor s výkonem 200 W (Obrázek 63). Součástí poháněcí soustavy je také škrticí ventil, který je použit u všech pneumatických pohonů v návrhu inspekčního sloupu. [36]



Obrázek 63 - Pneumatický motor PARKER P1V-S020 [36]

V následující tabulce jsou uvedeny základní vlastnosti a parametry použitého pneumatického motoru.

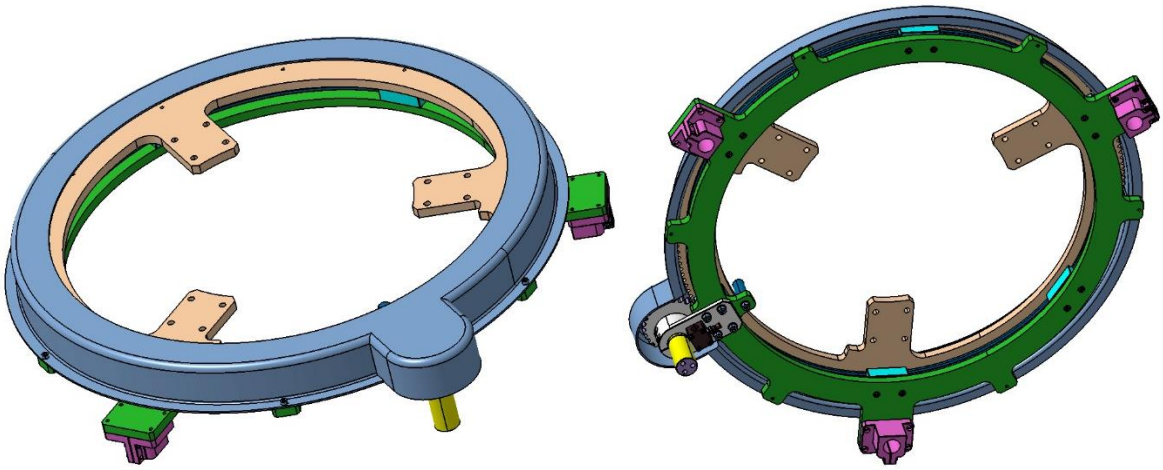
Tabulka 23 - základní vlastnosti pneumatického motoru PARKER [36]

Nominální výkon	200 W
Pracovní tlak	3 až 7,6 atmosfér
Pracovní teplota	-20 až +110 °C .
Délka rotační hřídele	24 mm
Délka motoru	151 mm
Průměr motoru	38 mm
Hmotnost motoru	0,7 kg
Tělo motoru	Nerezová ocel
Hřídel	Tvrdá nerezová ocel
Hltnost vzduchu při Pmax	6,2 l/s
Třída krytí	IP 68

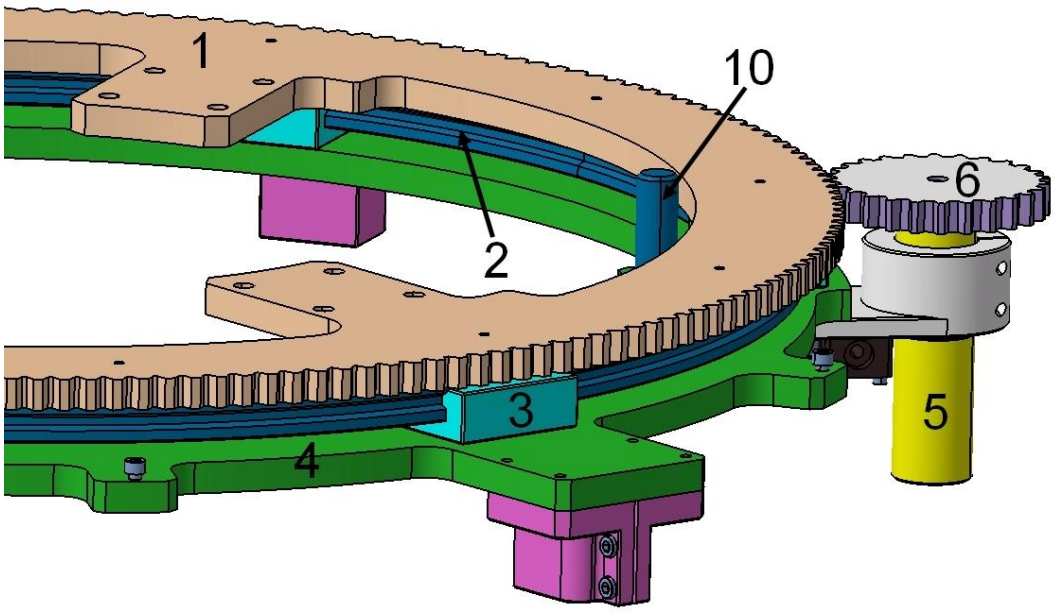
Další částí tohoto rotačního a nosného systému pro držení a rotaci kamer jsou kostky, které svírají prodlužovací tyče s kamerami, čímž je drží pevně na IB (Obrázek 61). Tyto kostky jsou umístěny na pohyblivém nosném, rotačním disku, a který má za úkol kamery posunout dále od ostatních zařízení na IB tak, aby nedošlo k jejich porušení.

Poslední hlavní nedílnou součástí tohoto mechanismu je kryt. Tento kryt zakrývá především část mechanismu, kterou tvoří ozubená kola a pneumatický motor. Zakrytovaný mechanismus je patrný z Obrázku 64. Kryt byl navrhnut a použit pro zvýšení bezpečnosti a zamezení nechtěného vniknutí do pohyblivého rotačního spojeno dvou ozubených kol.

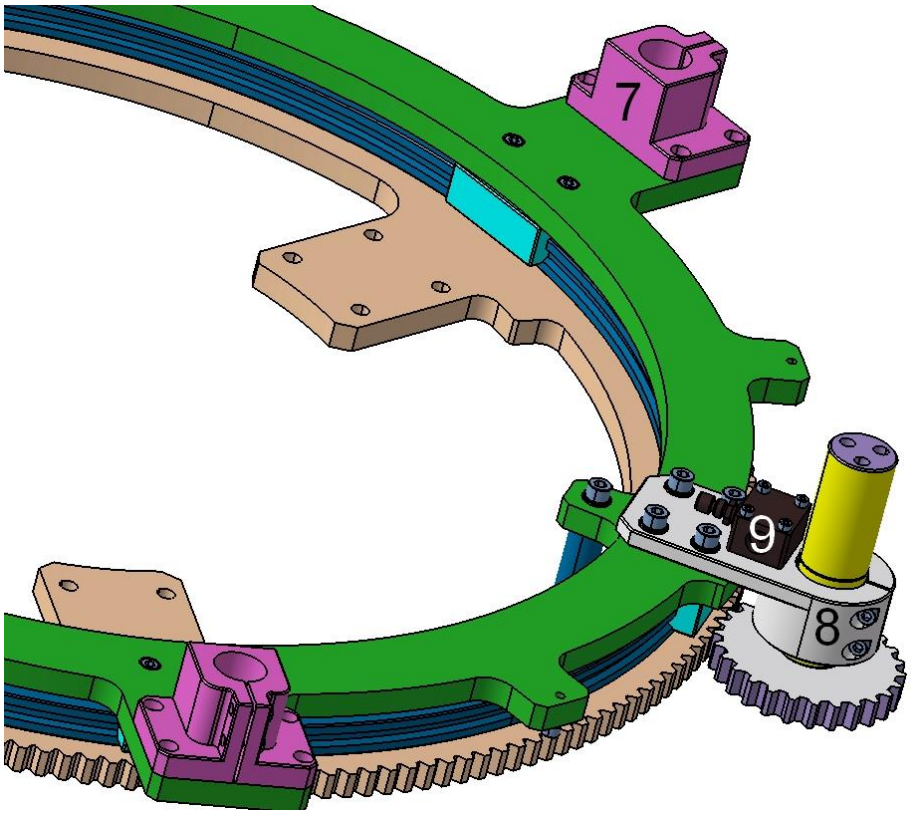
Všechny výše uvedené části mechanismu jsou uvedeny na Obrázku 65 a Obrázku 66.



Obrázek 64 - Umístění krytu na mechanismu pro držení a manipulaci kamer na IB (Kryt je na tomto obrázku vyznačen světle modrou barvou)



Obrázek 65 - Jednotlivé hlavní části mechanismu I (1 – Nosný ozubený disk, 2 - Kolejnice, 3 – Posuvný domek, 4 – Nosný kamerový disk, 5 – Pneumatický motor, 6 – Ozubené kolo motoru, 10 – Doraz kamer)



Obrázek 66 - Jednotlivé hlavní části mechanismu II (7 – Kostky pro sevření tyčí kamer, 8 – Držení pneumatického motoru, 9 – Škrticí ventil)

Co se týče samotné montáže tohoto mechanismu, je třeba ho na inspekční blok upevnit již při samotné montáži IB. Kruhové prvky, které tento celek obsahuje, jsou uzavřené kruhové součásti a po sestavení celého IB už není způsob, jak tento celek na IB usadit. Z toho důvodu se stává tento rotační mechanismus součástí podsestavy IB.

5.3 Osvětlovací systém

Pro kamerový záznam PS při vysouvání a zasouvání do kompaktní mříže bazénu, je třeba prostor osvítit. Z tohoto důvodu bude při návrhu třeba zohlednit také osvětlovací systém, který bude splňovat parametry pro osvit PS a zároveň bude schopný pracovat v zamořeném prostředí. [3]

V našem návrhu je samotný osvětlovací systém součástí kamerového inspekčního celku. Vybraná kamera VT XLRAD PT má na své konstrukci k dispozici čtyři, zapouzdřené, odstíněné LED diody s výkonem 20 W. Tato osvětlovací soustava je schopna osvítit stěnu PS tak, aby bylo možné zaznamenat plochu PS s dostatečnou kvalitou.

Umístění těchto osvětlovacích výkonových diod je patrné z obrázku vybrané kamery (Obrázek 58).

6 PEVNOSTNÍ ANALÝZY

Součástí tohoto návrhu jsou i základní pevnostní analýzy, které jsou určené pro zajištění mechanické odolnosti a mechanické bezpečnosti jednotlivých spojů a celků.

Pevnostní analýzy pro tento návrh rozdělujeme na dvě části. První část je ruční výpočet vybraných spojů. Druhá část je provedení základní modelové, deformační analýzy pro pohyb celého zařízení v pracovním prostředí.

U veškerých komponent, které jsou součástí nového stendu inspekcí, jsme se snažili použití při upevnění na IB přesné lícované šrouby. Tam kde to bylo konstrukčně proveditelné, tam tyto lícované šrouby použity byly. Tam kde ne, použili jsme obyčejné šrouby. Jak lícované, tak i obyčejné jsou z austenitické oceli 1.4301. V praxi se pak při takovýchto pevných spojích používají na matici i šroub rozdílné materiály. Například austenit a martenzit a to z toho důvodu, že pokud bychom použili na obě tyto spojovací součástí austenitickou nerezovou ocel, mohlo by dojít k zadření obou těchto částí.

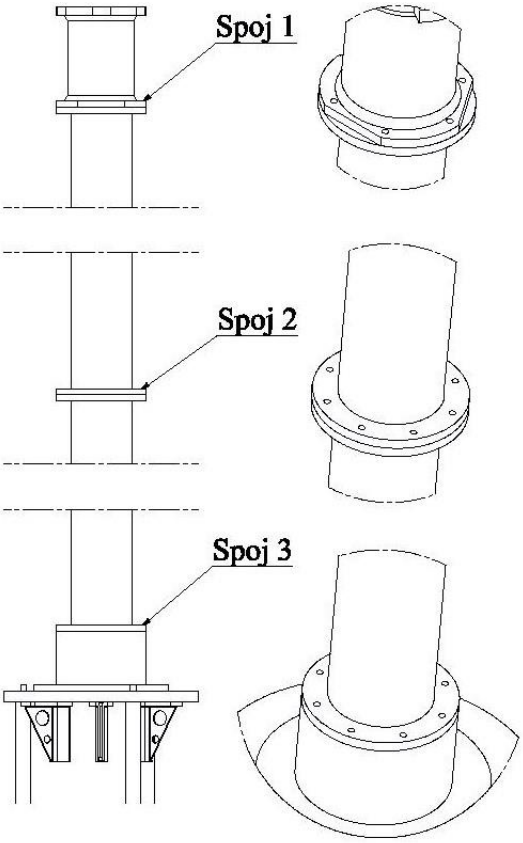
6.1 Pevnostní výpočty vybraných spojů

Při tomto typu výpočtu vycházíme ze základních pevnostních analýz a výpočtů pro základní šroubový spoj. Výpočet je dimenzování a ověření bezpečnosti jednotlivých spojů přírub a dalších vybraných komponent.

Tyto výpočty se dělí na dvě části:

1) Výpočet třech spojů přírub, které jsou umístěny v horní části sloupu.

Následující výpočty vycházejí s ověřené literatury. [24]



Obrázek 67 - Přehled umístění spojů v horní části inspekčního sloupu

První z přírub spojuje samotný inspekční sloup s horní přírubou manipulačního mostu a budeme tento spoj nazývat Spoj 1. Druhým spojem této části rozumíme spoj dvou nosným trubek, které nesou IB a přibližují ho k mříži bazénu S5. (Spoj 2). Poslední spoj v této kategorii je spojení nosné trubky s aretační přírubou nesoucí IB (Spoj 3). (Obrázek 67).

Nejprve je nutné vypočítat provozní sílu, kterou je v ose každý jeden šroub namáhán.

$$F_s = \frac{g \cdot m}{i} \tag{6.1}$$

Kde g je gravitační zrychlení,

m je hmotnost jednotlivých zatížených úseků, které působí na jednotlivé spoje tažnou silou,

i je počet šroubů přírubového spoje.

Nyní je potřeba vypočítat dovolené napětí. Vycházíme z vlastností materiálu. Pokud vynásobíme minimální mez kluzu číslem 0,7, dostaneme mez elasticity a můžeme tedy pro výpočet dovoleného napětí uvažovat

$$\sigma_d = \frac{0{,}7 \cdot R_e}{k} \tag{6.2}$$

Kde k je zvolený koeficient bezpečnosti a součin $0{,}7 \cdot R_e$ je mez elasticity. Následně víme, že pro dovolené napětí ve šroubu platí také vztah

$$\sigma_d = \frac{F_s}{A_s} \tag{6.3}$$

Kde A_s je výpočtový průřez šroubu, který můžeme vypočítat jako

$$A_s = \pi \cdot \frac{d_m^2}{4} \tag{6.4}$$

Po dosazení do rovnice (6.3) dostáváme vztah

$$\sigma_d = \frac{F_s}{\pi \cdot \frac{d_m^2}{4}} = \frac{4 \cdot F_s}{\pi \cdot d_m^2} \tag{6.5}$$

Z rovnice (6.6) jsme schopni vyjádřit vztah pro minimální malý průměr šroubu.

$$d_m = \sqrt{\frac{4 \cdot F_s}{\pi \cdot \sigma_d}} \tag{6.6}$$

Po výpočtu tohoto minimálního malého průměru šroubu zvolíme šroub, který má minimální malý průměr nejbližší nižší. Následně pak můžeme dimenzovat spoj například tak, že použijeme průměr ještě daleko větší, než byl doporučený nejbližší vyšší. [24]

Následně je nutné vypočítat pro zvolený šroub nový koeficient bezpečnosti, který vyjádříme podle následujících vztahů

$$\frac{0{,}7 \cdot R_e}{k} = \frac{F_s}{\pi \cdot \frac{d_m^2}{4}} => k_x = \frac{\pi \cdot \frac{d_{m2}^2}{4} \cdot R_e \cdot 0{,}7}{F_s} \tag{6.7}$$

Kde d_{m2} je minimální malý průměr zvoleného šroubu.

Nyní je třeba uvažovat při pevnostním výpočtu s předpětím, abychom byli schopni určit sílu potřebnou pro dotažení jednotlivých šroubů. Protože víme, které šrouby chceme použít, jsme schopni z normovaných tabulek určit střední silu F_i, která je potřebná pro dotažení šroubového spoje. Nazýváme ji síla předpětí. Stejně tak již umíme určit výpočtový průřez šroubu a můžeme vypočítat napětí od síly předpětí.

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_s} \tag{6.8}$$

Kde σ_i je napětí od síly předpětí. Pro výpočet momentu potřebného pro vyvolání předpětí je třeba vypočítat část provozní síly přenášené šroubem, označované C.

$$C = \frac{k_s + k_p}{k_s} \tag{6.9}$$

Dále jsme schopni určit nové dovolené napětí s uvažováním předpětí a části síly přenášené šroubem.

$$\sigma_{d2} = \frac{F_s \cdot C}{A_s} + \frac{F_i}{A_s} = \frac{F_s \cdot C}{A_s} + \sigma_i \tag{6.10}$$

Dosazením do tohoto vztahu bylo vypočteno napětí, které je potřebné pro vyvolání předpětí ve šroubu. Následně již určíme pouze moment potřebný pro vyvolání předpětí a nový koeficient bezpečnosti s uvažováním předpětí.

$$M_i = K \cdot F_i \cdot d \tag{6.11}$$

Kde M_i je výše uvedený moment,

K je součinitel utahovacího momentu a

d je jmenovitý průměr vybraného šroubu pro počítaný spoj.

$$k_2 = \frac{R_e \cdot 0{,}7}{\sigma_{d2}} \tag{6.12}$$

Kde k_2 je nový koeficient bezpečnosti s uvažování předpětí ve šroubu.

Nyní provedeme výpočet dle uvedeného postupu.

Pro šrouby, které budou spojovat tyto tři přírubové spoje, jsme zvolili materiál s následujícími vlastnostmi:

Šrouby A4 z austenitické, nerezové oceli s pevnostní třídou 80 podle ISO 3506.

Minimální mez kluzu. $R_e = 600$ MPa,

Minimální pevnost v tahu $R_m = 800$ MPa,

Zkušební napětí $S_p = 800$ MPa,

Tuhost spojovaných součástí $k_p = 913\ \mathrm{kN \cdot mm^{-1}}$,

Tuhost šroubu $k_s = 674\ \mathrm{kN \cdot mm^{-1}}$.

Svěrná délka šroubu je pak pro všechny tyto spoje $l_s = 50$ mm.

Následně je dán modul pružnosti $E = 210$ GPa,

Součinitel utahovacího momentu pro neupravené závity $K = 0{,}3$,

gravitační zrychlení $g = 9{,}81373\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

Byl zvolen koeficient bezpečnosti $k = 3$ a

počet šroubů, spojovaných tyto tři přírubové spoje je $i = 6$.

V následujících tabulkách jsou konkrétní výsledky pro pevnostní výpočet prvních třech přírubových spojů bez uvažování předpětí. [24] [25]

Tabulka 24 - Vypočtené hodnoty pro první tři přírubové spoje (volba průměru šroubů)

	m	F_s	σ_d	d_m	**d**	d_{m2}	A_s
	kg	N	Mpa	mm	-	mm	mm^2
Spoj 1	1531,6	2505,1	140	4,77	M12	11,701	107,48
Spoj 2	1473,9	2410,7		4,68	M12	11,701	107,48
Spoj 3	1416,5	2316,9		4,59	M12	11,701	107,48

Tabulka 25 - Vypočtené hodnoty pro první tři přírubové spoje (výpočet utahovacího momentu)

	k_x	σ_i	**C**	σ_{d2}	M_i	k_2
	-	Mpa	-	Mpa	N·m	-
Spoj 1	18,02	294,01	0,424	303,92	113,76	1,382
Spoj 2	18,73			303,54	113,76	1,384
Spoj 3	19,48			303,17	113,76	1,385

Příklad výpočtu pro Spoj 1 zatížený celkovou hmotností 1531,6 kg:

$$F_s = \frac{g \cdot m}{i} = \frac{9{,}81373 \cdot 1531{,}6}{6} = 2505{,}1 \text{ N}$$

$$\sigma_d = \frac{0{,}7 \cdot R_e}{k} = \frac{0{,}7 \cdot 600}{3} = 140 \text{ MPa}$$

$$d_m = \sqrt{\frac{4 \cdot F_s}{\pi \cdot \sigma_d}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2505{,}1}{\pi \cdot 140}} = 4{,}77 \text{ mm}$$

Nejbližší vyšší šroub, který můžeme použít, je vzhledem k rezervě M6. Protože ale navrhujeme zařízení pro jaderný průmysl do kontrolovaného pásma, volíme šrouby M12. Šest šroubů M12 bude tedy spojovat tyto dvě příruby v místě Spoj 1y. Nejmenší malý průměr tohoto metrického šroubu je pak 11,701 mm. [24]

$$A_s = \pi \cdot \frac{d_m^2}{4} = \pi \cdot \frac{11{,}701^2}{4} = 107{,}48 \text{ mm}^2$$

$$k_x = \frac{\pi \cdot \frac{d_{m2}^2}{4} \cdot R_e \cdot 0{,}7}{F_s} = \frac{\pi \cdot \frac{11{,}701^2}{4} \cdot 600 \cdot 0{,}7}{2505{,}1} = 18{,}02$$

Nový koeficient bezpečnosti vyšel velmi vysoký, což znamená, že tento spoj je naddimenzovaný. To je správně a zajišťuje to vysokou bezpečnost takového spoje.

Pro výpočet napětí od síly předpětí jsme zvolili dle normy ISO 3506 sílu utažení pro šroub M12 (A4) rovnu 31600 N pro koeficient tření 0,2. [25]

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_s} = \frac{31600}{107{,}48} = 294{,}01 \text{ MPa}$$

$$C = \frac{k_s + k_p}{k_s} = \frac{674 + 913}{674} = 0{,}424$$

$$\sigma_{d2} = \frac{F_s \cdot C}{A_s} + \sigma_i = \frac{2505{,}1 \cdot 0{,}424}{107{,}48} + 294{,}01 = 303{,}92 \text{ MPa}$$

$$M_i = K \cdot F_i \cdot d = 0{,}3 \cdot 31600 \cdot 12 = 113{,}76 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$k_2 = \frac{R_e \cdot 0{,}7}{\sigma_{d2}} = \frac{600 \cdot 0{,}7}{303{,}92} = 1{,}382$$

Z materiálových vlastností těchto šroubů vyplývá, že je potřeba je utáhnout silou 113,76 N·m. Při takovémto dotažení je koeficient bezpečnosti 1,382, což je dostačující. Pro větší bezpečnost je možné spoje dotáhnout o něco menším momentem.

Druhou částí pevnostních výpočtů bude výpočet spojů jednotlivých pater inspekčního bloku.

Patro je vždy zavěšeno na třech tyčích a do stejného patra jsou upevněny tyče následující části IB. Pro každé patro je tedy počítat dva pevnostní příklady. Výjimkou bude první patro a poslední patro, v nichž jsou spoje vždy jen jedny. Obrázek 68 ukazuje rozložení spojů po IB.

Co se týče výpočtu pro tyto spoje, je velmi podobný, jako výpočet pro příruby z horní části inspekčního sloupu. Protože se zde ale již nebavíme o šroubech z austenitické oceli dle normy ISO 3506, ale o austenitické oceli 1.4301, která je pro tyto příruby a tyče použita, budeme muset vypočítat některé neznámé, které byly v předchozím případě dány jako tabelovaná konstanta. [24]

Abychom byli schopni určit zkušební napětí tohoto materiály, vyjdeme z následujícího vztahu:

$$S_p = 0{,}75 \cdot R_e \tag{6.13}$$

Kde S_p je zkušební napětí daného materiálu. Abychom byli schopni zde určit konstantu C pro část provozní síly přenášené šroubem, musíme vypočítat oba dva její výpočtové koeficienty. Tyto koeficienty nejsou pro tento typ materiálu tabelované. Oba vztahy (6.14) a (6.15) jsou odvozené z použité literatury.

$$k_s = \frac{S_d \cdot A_s \cdot E}{S_d \cdot l_b + A_s \cdot l_g} \tag{6.14}$$

$$k_p = \frac{0{,}5774 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{2 \cdot \ln\left(5 \cdot \frac{0{,}5774 \cdot l_s + 0{,}5 \cdot d}{0{,}5774 \cdot l_s + 25 \cdot d}\right)} \tag{6.15}$$

Kde E je modul pružnosti, S_d je průřez dříku šroubu, l_g je délka válcové části dříku bez závitu, l_b je délka části dříku se závitem, l_s je svěrná délka, d je jmenovitý vybraný průměr závitu.

Výpočet průměru dříku šroubu je dán následujícím vztahem:

$$S_d = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \tag{6.16}$$

Abychom byli schopni zjistit sílu, která je potřebná pro předpětí v tomto spoji, je třeba vypočítat napětí od síly předpětí σ_i. V předchozím případě výpočtu jsme měli sílu danou jako konstantu pro vybranou velikost šroubu.

$$\sigma_i = 0{,}75 \cdot S_p \tag{6.17}$$

Nyní jsme schopni spočítat utahovací sílu (sílu předpětí).

$$F_i = A_s \cdot \sigma_i \tag{6.18}$$

Nyní již známe všechny hodnoty veličin, které jsou nutné ke kompletnímu pevnostnímu výpočtu.

Pro tyče (jejich upevňovací část), které budou spojovat tato patra IB, jsme zvolili materiál s následujícími vlastnostmi (Austenitická ocel 1.4301).

Minimální mez kluzu. $R_e = 210$ MPa,

Minimální pevnost v tahu $R_m = 615$ MPa,

Svěrná délka šroubu je pak pro všechny tyto spoje $l_s = 35$ mm,

délka válcové části dříku bez závitu $l_g = 30$ mm,

délka části dříku se závitem $l_b = 5$ mm,

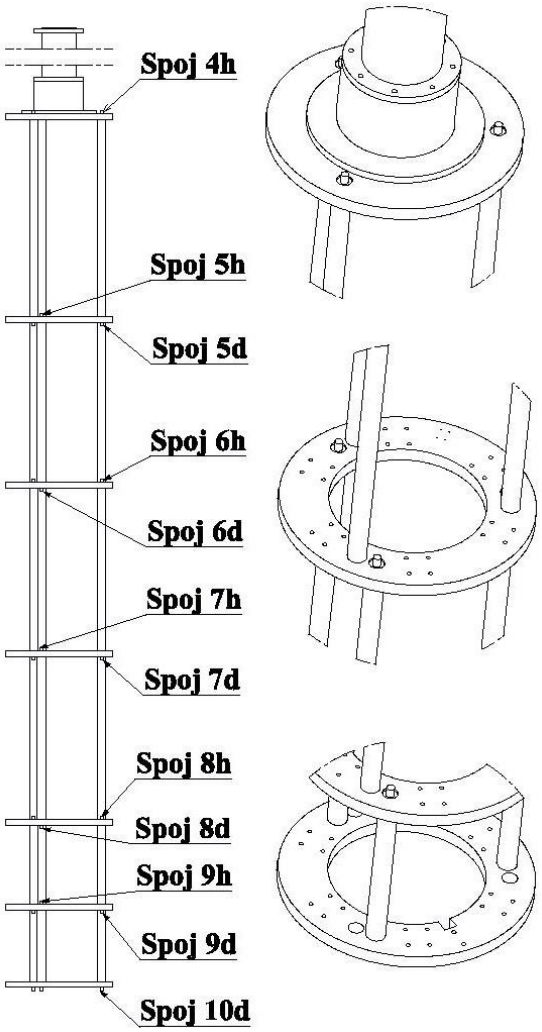
Následně je dán modul pružnosti $E = 210$ GPa,

Součinitel utahovacího momentu pro neupravené závity $K = 0{,}3$,

gravitační zrychlení $g = 9{,}81373\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

Byl zvolen koeficient bezpečnosti $k = 3$ a

počet šroubů, spojovaných tyto tři přírubové spoje je $i = 3$. [24] [26]



Obrázek 68 - Přehled umístění spojů na inspekčním bloku

V následujících tabulkách jsou výsledky pro pevnostní výpočet spojů pater inspekčního bloku.

Tabulka 26 - Vypočtené hodnoty pro spoje IB (první část)

	m	F_s	σ_d	d_m	**d**	d_{m2}	S_d	A_s	k_x
	kg	N	Mpa	mm	-	mm	mm^2	mm^2	-
Spoj 4h	1227,7	4016,11	49	10,22	M20	19,632	314	302,55	11,07
Spoj 5h	1069,2	3497,61		9,54	M20	19,632	314	302,55	12,72
Spoj 5d	1116	3650,71		9,74	M20	19,632	314	302,55	12,18
Spoj 6h	909,3	2974,54		8,79	M20	19,632	314	302,55	14,95
Spoj 6d	956,1	3127,64		9,01	M20	19,632	314	302,55	14,22
Spoj 7h	748,7	2449,18		7,98	M20	19,632	314	302,55	18,16
Spoj 7d	795,5	2602,27		8,22	M20	19,632	314	302,55	17,09
Spoj 8h	613,7	2007,56		7,22	M20	19,632	314	302,55	22,15
Spoj 8d	634,8	2076,58		7,35	M20	19,632	314	302,55	21,42
Spoj 9h	387,9	1268,92		5,74	M20	19,632	314	302,55	35,05
Spoj 9d	407,3	1332,38		5,89	M20	19,632	314	302,55	33,38
Spoj 10d	184,3	602,89		4,01	M20	19,632	314	302,55	73,76

Tabulka 27 - Vypočtené hodnoty pro spoje IB (druhá část)

	S_p	F_i	σ_i	k_p	k_s	**C**	σ_{d2}	M_i	k_2
	Mpa	N	Mpa	$kN.mm^{-1}$	$kN.mm^{-1}$	-	Mpa	N·m	-
Spoj 4h	157,5	35738,85	118,1	3083,69	1873,87	0,378	123	214,43	1,194
Spoj 5h							122	214,43	1,200
Spoj 5d							123	214,43	1,198
Spoj 6h							122	214,43	1,206
Spoj 6d							122	214,43	1,205
Spoj 7h							121	214,43	1,210
Spoj 7d							121	214,43	1,211
Spoj 8h							121	214,43	1,219
Spoj 8d							121	214,43	1,217
Spoj 9h							120	214,43	1,227
Spoj 9d							120	214,43	1,226
Spoj 10d							119	214,43	1,237

Příklad výpočtu pro Spoj 4h zatížený celkovou hmotností 1227,7 Kg.

$$F_s = \frac{g \cdot m}{i} = \frac{9{,}81373 \cdot 1227{,}7}{3} = 4016{,}11 \text{ N}$$

$$\sigma_d = \frac{0{,}7 \cdot R_e}{k} = \frac{0{,}7 \cdot 210}{3} = 49 \text{ MPa}$$

$$d_m = \sqrt{\frac{4 \cdot F_s}{\pi \cdot \sigma_d}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4016{,}11}{\pi \cdot 49}} = 10{,}22 \text{ mm}$$

Nejbližší vyšší závit, který můžeme použít je M12. Protože ale navrhujeme zařízení pro jaderný průmysl do kontrolovaného pásma, volíme závity M20. Tři závity s průměrem M20 ponesou vždy jednotlivé patro IB. Nejmenší malý průměr tohoto metrického závitu je 19,632 mm. [24]

$$A_s = \pi \cdot \frac{d_{m2}^2}{4} = \pi \cdot \frac{19{,}632^2}{4} = 302{,}55 \text{ mm}^2$$

$$S_d = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \frac{20^2}{4} = 314 \text{ mm}^2$$

$$k_x = \frac{\pi \cdot \frac{d_{m2}^2}{4} \cdot R_e \cdot 0{,}7}{F_s} = \frac{\pi \cdot \frac{19{,}632^2}{4} \cdot 210 \cdot 0{,}7}{4016{,}11} = 11{,}07$$

Nový koeficient bezpečnosti vyšel vysoký, což znamená, že tento spoj je naddimenzovaný. To je opět správně, je tím zajištěna vysoká bezpečnost takového spoje.

$$\sigma_i = 0{,}75 \cdot S_p = 0{,}75 \cdot 157{,}5 = 118{,}1 \text{ MPa}$$

Nyní spočteme sílu předpětí.

$$F_i = A_s \cdot \sigma_i = 302{,}55 \cdot 118{,}1 = 35738{,}85 \text{ N}$$

Dále výpočet koeficientu C.

$$k_s = \frac{S_d \cdot A_s \cdot E}{S_d \cdot l_b + A_s \cdot l_g} = \frac{314 \cdot 302{,}55 \cdot 210}{314 \cdot 5 + 302{,}55 \cdot 30} = 1873{,}87 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$$

$$k_p = \frac{0{,}5774 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{2 \cdot \ln\left(5 \cdot \frac{0{,}5774 \cdot l_s + 0{,}5 \cdot d}{0{,}5774 \cdot l_s + 25 \cdot d}\right)} = \frac{0{,}5774 \cdot \pi \cdot 210 \cdot 20}{2 \cdot \ln\left(5 \cdot \frac{0{,}5774 \cdot 35 + 0{,}5 \cdot 20}{0{,}5774 \cdot 35 + 25 \cdot 20}\right)}$$

$$k_p = 3083{,}69 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$$

$$C = \frac{k_s + k_p}{k_s} = \frac{1873{,}87 + 3083{,}69}{1873{,}87} = 0{,}378$$

Nyní vypočteme nové napětí s uvažováním předpětí a s koeficientem C.

$$\sigma_{d2} = \frac{F_s \cdot C}{A_s} + \sigma_i = \frac{4016{,}11 \cdot 0{,}378}{302{,}55} + 118{,}1 = 123{,}14 \text{ MPa}$$

$$M_i = K \cdot F_i \cdot d = 0{,}3 \cdot 35738{,}85 \cdot 20 = 214{,}43 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$k_2 = \frac{R_e \cdot 0{,}7}{\sigma_{d2}} = \frac{210 \cdot 0{,}7}{123{,}14} = 1{,}194$$

Podle provedeného výpočtu je zřejmé, že pro utažení těchto spojů je třeba moment 214,43 N·m. Koeficient bezpečnosti v tomto případě je 1,194.

Spoje IB jsou naddimenzované a tedy bezpečné a velmi odolné. Jediné riziko jejich poškození spočívá v přetažení těchto spojů při dotahování. Síla předpětí nesmí být překročena.

6.2 Deformační analýzy

Účelem základních deformačních analýz je zajištění životnosti a odolnosti navrhovaného inspekčního sloupu.

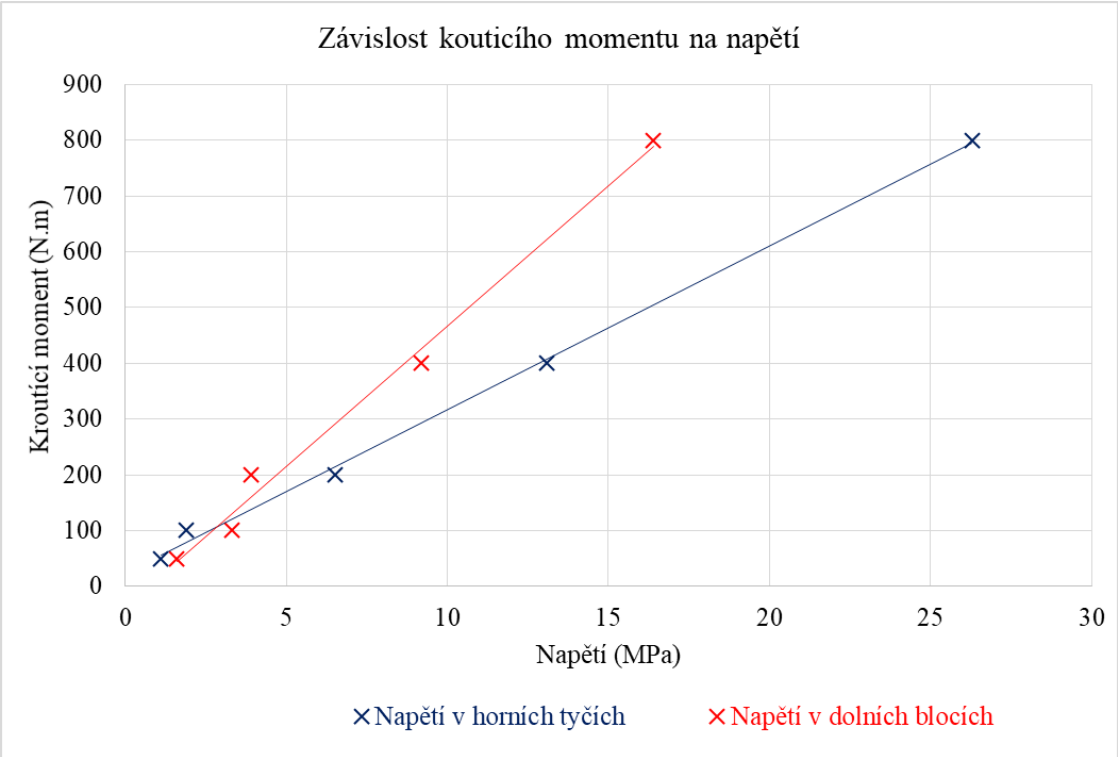
První analýza byla provedena z pohledu držení reakce záchytu PS při zamykání hlavice PS a při odemykání hlavice PS. Při této manipulaci dochází k namáhání v podobě zkrutu celého inspekčního sloupku. Protože neznáme sílu, kterou se záchyt zamyká a odemyká, nemůžeme přesně modelovat tuto situaci. Pokud si ale zvolíme několik hodnot krouticího momentu a tímto momentem budeme působit na spodní aretační bloky, které budou držet reakci, docílíme přehledné závislosti změny napětí na krouticím momentu záchytu PS.

Podle zvoleného krouticího momentu působícího na spodní aretační bloky, jsme provedli analýzu v programu CATIA V5 R20, prostřednictvím modulu *„Analýzy a simulace“*. Zvolený počet výpočtových uzlů byl 224310 uzlů a počet výpočtových prvků byl 851364 prvků. Pro každou zvolenou hodnotu jsme odečetli hledané napětí v kritickém, nejslabším místě aretačního bloku a hlavně v oblasti upevnění horních nosných tyčí, které jsou na zkrut logicky nejvíce namáhány.

Tabulka 28 - Tabulka hodnot odečtených při krouticím namáhání ve spodní části IB

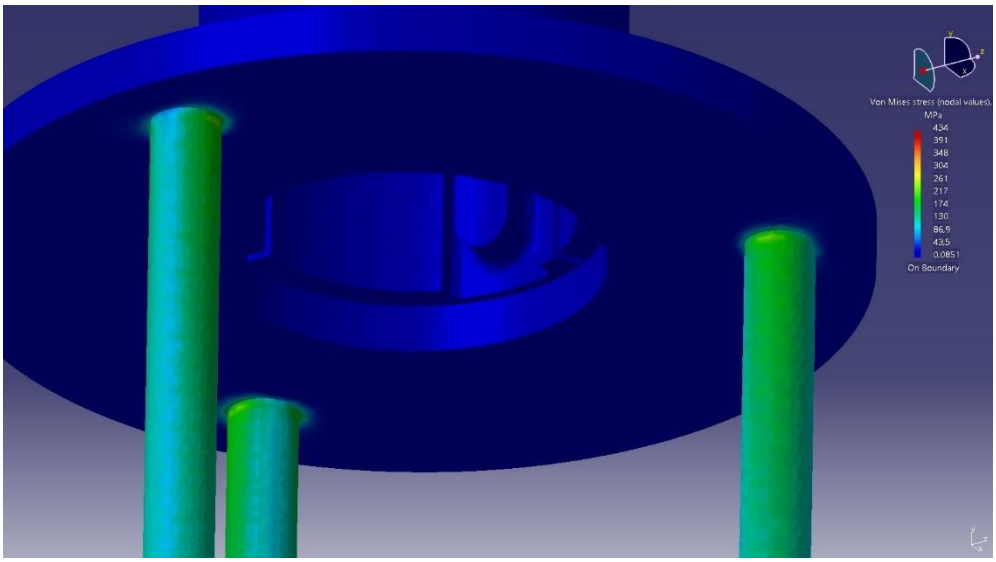
Krouticí moment	N·m	50	100	200	400	800
Napětí v horních tyčích	Mpa	1,1	1,9	6,5	13,1	26,3
Napětí v dolních blocích	MPa	1,6	3,3	3,9	9,2	16,4

Z naměřených hodnot byla sestrojena grafická závislost krouticího momentu na jednotlivých napětích jak v horních tyčích, tak i v dolních aretačních blocích (Obrázek 69).



Obrázek 69 – Grafická závislost krouticího momentu na napětí ve sledovaných místech IB

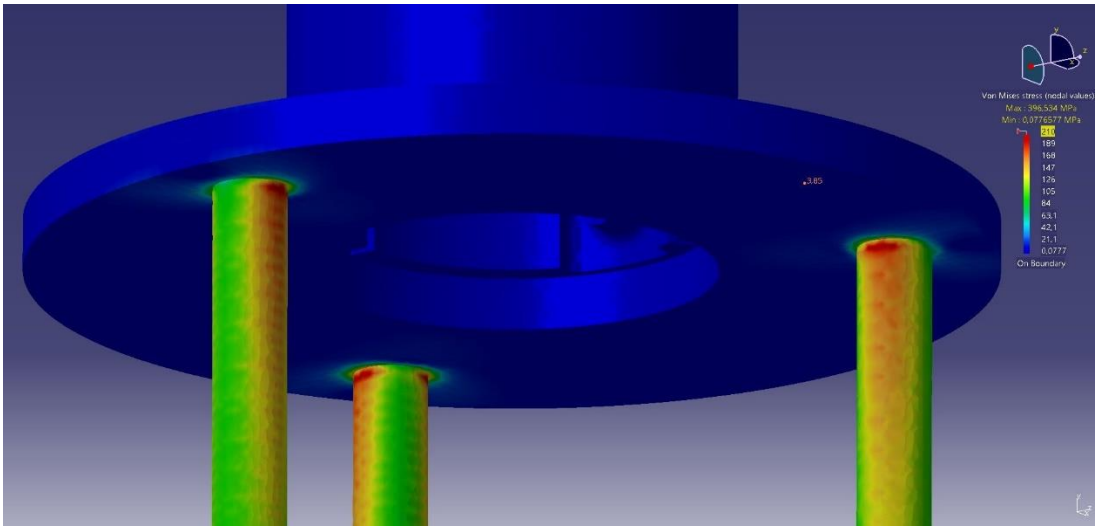
Jak je patrné z grafické závislosti, napětí ve sledovaných místech rostou takřka lineárně se zvyšujícím se krouticím momentem, kterým působí záchyt PS na bloky v posledním, spodním patře IB při manipulaci. Na Obrázku 70 je vidět, že nejdůležitější místo je i při momentech okolo 800 N·m velmi málo namáhané.



Obrázek 70 - Napětí v horních tyčích při zvoleném krouticím momentu

Materiál, ze kterého jsou tyče a tělo IB vyrobeno má smluvní mez kluzu 210 MPa. Nasimulovali jsme tedy hraniční stav, při kterém by již mohlo dojít k deformaci materiálu. Bavíme se tedy o překročení smluvní meze kluzu pro tento materiál (1.4301).

Simulace proběhla opět v programu CATIA V5 R21. Počet výpočtových uzlů byl 984619 a počet výpočtových prvků pak 4126894.



Obrázek 71 – Zjištění krouticího momentu pro smluvní mez kluzu

Výsledkem této simulace je, že při překročení krouticího momentu záchytu PS, působícího na spodní aretační bloky, nad hodnotu 8650 N·m, může docházet k deformaci materiálu v místech upevnění horních tyčí, viz Obrázek 71.

Výsledný krouticí moment, při kterém dojde k překročení smluvní meze kluzu je pro náš případ neočekávatelný, čímž potvrdili dostatečnou mechanickou pevnost těla IB.

V poslední deformační analýze jsme se pokusili namodelovat situaci, při níž dochází k posuvu inspekčního sloupu v prostorách bazénu. Pro tuto analýzu je třeba znát základní teorii, při níž se těleso pohybuje v různě hustém prostředí. Vyjdeme z následujícího vztahu pro výpočet síly na prostředím se pohybující těleso.

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \tag{6.19}$$

Kde F je síla působící na plochu pohybujícího se tělesa,

ρ je hustota daného prostředí,

v je rychlost, kterou se dané těleso pohybuje a

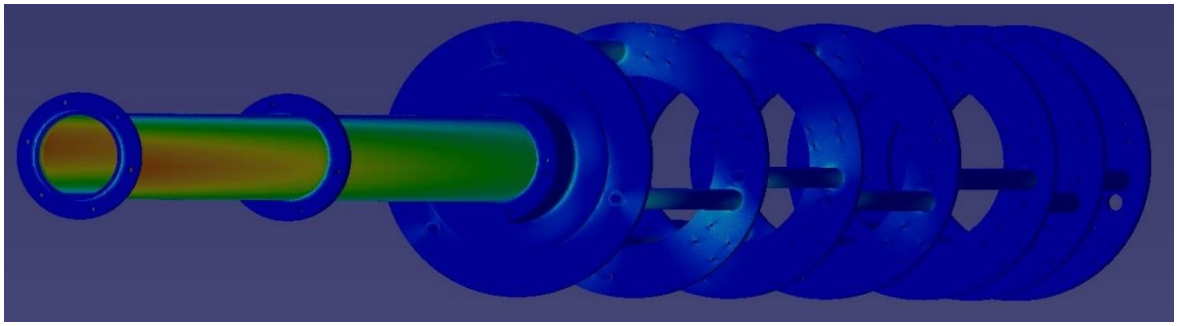
S je plocha daného tělesa.

V našem případě je tělesem navržený inspekční sloup. Zjistili jsme jeho celkovou plochu, která je 2,677 m^2. Rychlost, kterou se inspekční sloup v prostorách bazénu pohybuje je maximálně 0,19 $m \cdot s^{-1}$. Hustotu prostředí jsme zvolili 1000 $Kg \cdot m^{-3}$ (lehká voda). Následný výpočet:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 0{,}19^2 \cdot 2{,}677 = 48{,}32 \text{ N}$$

Síla, kterou jsme vypočetli je velmi malá, a dá se říci zanedbatelná. Pro tuho sílu, působící v těžišti inspekčního sloupu, jsme provedli modelovou analýzu v programu CATIA V5 R21. Počet výpočtových uzlů a prvků byl stejný, jako v předešlém případě.

Maximální napětí, které na inspekční blok působilo, bylo v tomto případě pouze 4,64 MPa. Na následujícím obrázku (Obrázek 72) je patrné místo na inspekčním sloupu, které je touto silou namáháno a je tedy i nejvíce namáhaným místem.



Obrázek 72 - Namáhání sloupku díky odporu prostředí při jeho pohybu v prostorách bazénu S5

Z výsledku simulace vyplývá, že největší namáhání je v tomto případě v horní části spojovací trubky. Hodnota napětí 4,64 MPa je ale natolik malá, že výsledek analýzy je opět velmi kladný. Pohyb inspekčního sloupu při rychlosti 0,19 m/s nemůže inspekční sloup mechanicky ohrozit.

7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout nový sloup inspekcí, kterým bude možno provádět inspekce na jaderných palivových souborech. Úvodem této práce je shrnutí jaderné energetiky a jaderné elektrárny Temelín. Primární okruh ETE je právě tím místem, kde bude navrhované zařízení v provozu. Okrajově byl popsán palivový soubor, na kterém se bude provádět daná inspekce a také bazén vyhořelého paliva, v jehož prostoru bude inspekční sloup umístěn.

Úkolem další kapitoly bylo popsat základní požadavky a budoucí vzhled inspekčního bloku. Byly zde uvedeny podmínky prostředí, ve kterém by měl sloup inspekcí pracovat, i chemické látky, které v tomto popsaném prostředí nelze použít při konstrukčním návrhu.

Následující část práce se zabývá popisem tří způsobů, jakými je možné v současné době inspekci PS provádět. Na úvod této kapitoly byly popsány základní deformace, které mohou na PS nastat. Následně je popsáno nejprve měření pomocí LVDT sond, které je využito při návrhu našeho zařízení. Popsán byl také způsob měření pomocí UZ sond a s využitím 3D laserové triangulace.

Čtvrtá kapitola se zaměřuje přímo na konstrukční návrh inspekčního sloupu. Popisuje základní nosné, konstrukční a manipulační prvky, které inspekční sloup obsahuje, nebo které s inspekčním sloupem úzce souvisí. Jde zejména o záchyt PS, manipulační most, mříž bazénu vyhořelého jaderného paliva a tělo samotného inspekčního sloupu. Jsou zde také popsány použité konstrukční materiály a typy základních spojovacích prvků tohoto návrhu. Dále se kapitola zabývá manipulací s PS během inspekce a aretací PS během inspekce i při manipulaci s PS. Jsou zde popsány hlavní aretační a funkční prvky. Jde například o aretační přírubu, aretační blok nebo aretaci ve spodní části inspekčního bloku.

Tato část je zaměřena na návrh a konstrukci inspekčních prvků celého inspekčního bloku. Nejprve je zde popsán výběr LVDT senzorů, kterými bude následně prováděno zjišťování průhybu a zkrutu PS. K vybranému LVDT senzoru jsou zde uvedeny také varianty převodníku, vstupního terminálu a i vyhodnocovacího celku. Nedílnou součástí je také popis mechanismu, který bude s LVDT senzory manipulovat v ose kolmé k ose PS. Tato zařízení se jmenují měřicí tanky.

Dalším zařízením je mechanismus, který slouží pro určení růstu PS. Popis zjišťování růstu PS je zde také popsán. Dále byl vybrán snímač teploty. K snímačům teploty jsou zde uvedeny alternativy převodníků. Poslední částí této kapitoly je návrh a výběr kamerových systému, které budou provádět vizuální kontrolu PS. Opět je zde zmíněno několik typů kamer a následný výběr jedné z nich. Následně je podrobněji popsáno upevnění kamery a možnosti jejich manipulací na inspekčním bloku. Na závěr je zde okrajově popsán osvětlovací systém pro kamery.

Předposledním bodem této diplomové práce jsou pevnostní analýzy. Kapitola je rozdělena do dvou částí. V první části byly provedeny pevnostní výpočty hlavních spojů celého zařízení. Zaměřili jsme se na všechny nosné spoje inspekčního sloupu a byly provedeny výpočty, které vedly k dimenzování těchto spojů a následnému vyhodnocení bezpečnosti. V druhé části byly provedeny dvě základní modelové, deformační analýzy. Účelem těchto analýz bylo ověřit pevnost a životnost inspekčního sloupu při dvou standartních úkonech, a to pohybu inspekčního sloupu v prostorách bazénu S5 při pojíždění nad mříží bazénu a při držení reakce záchytu PS při zamykání a odemykání PS. Výsledkem obou těchto analýz byla dostatečná materiálová i konstrukční pevnost celého navrženého zařízení. Napětí působící v hlídaných místech inspekčního bloku byla v provozních stavech takřka zanedbatelná.

Závěrečnou část tvoří výkresová dokumentace. Byl vypracován výkres sestavy navrženého inspekčního sloupu. Tento výkres je tvořen jedním hlavním listem a je ukazatelem základních rozměrů a popisů hlavní sestavy tohoto návrhu. Výkresová dokumentace je v této práci uvedena ve formě přílohy (Příloha A). V příloze jsou vytvořeny také další obrázky celku navrženého inspekčního sloupu pro nový stend inspekcí (N-SIO).

Součástí práce jsou také „renderované“ obrázky hlavní sestavy navrženého nového stendu inspekcí (Příloha B).

POUŽITÁ LITERATURA

[1] *Technical Learning: What is a LVDT?* [online]. OMEGA Engineering [cit. 2017-10-17]. Dostupné z: https://www.omega.co.uk/technical-learning/linear-variable-displacement-transducers.html

[2] *Introduction of 3D Fuel Measurement System*. Westinghouse, 2017, 7 s.

[3] *N-SIO ZADÁVACÍ SPECIFIKACE PRO NÁVRH ZAŘÍZENÍ: Ae 16545/Dok Rev. 00*. ŠKODA JS a.s. Ivan Rausch, 2016.

[4] *Ultrazvuková kontrola*. Pňovice 215: WELDINSPECT, 2015. Dostupné také z: https://weldinspect.cz/metody/ultrazvukova-kontrola/

[5] M. Kristek. *ULTRAZVUK V DIAGNOSTICE MATERIÁLŮ*. Bakalářská práce. Brno: VUT v Brně, 2015, 40 s. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=105598

[6] Inženýrské centrum Fpribor. Fpribor: VUT v Brně, 2017, 40 s. Dostupné také z: http://fpribor.ru/products/ud9812/

[7] *Immersion Transducers*. Sonomecha Technologies,. 2017, 40 s. Dostupné také z: http://sonomecha.com/NDT-Ultrasonic-Transducers%20/ultrasonic-immersion-level-transducers

[8] https://www.omega.co.uk/pressure/images/LD320_m.jpg

[9] http://sonomecha.com

[10] *Jaderná energetika: Výroba elektřiny*. ČEZ, 2017. Dostupné také z: https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika.html

[11] *N-SIO ZADÁVACÍ SPECIFIKACE PRO NÁVRH ZAŘÍZENÍ: Ae 16545/Dok Rev. 00*. Dokument s obsahem chráněných práv ŠKODA JS a.s. ŠKODA JS, 2016.

[12] *LIPS® P115 RUGGED SUBMERSIBLE STAND-ALONE LINEAR POSITION SENSOR*. Positek Ltd, Andoversford Industrial Estate, Cheltenham GL54 4LB U.K. Dostupné také z: http://www.positek.com

[13] *2400 FAST DISPLAY / ALARM UNIT: DTS_2400_0509_ENG*. GEFRAN spa via Sebina. Dostupné také z: http://www.gefran.com

[14] *Status report 93 - VVER–1000*. IAEA. Dostupné také z: https://aris.iaea.org

[15] https://cs.wikipedia.org/wiki/LVDT#/media/File:LVDT.png

[16] *Industrial LVDT Displacement Transducer: Position Sensor | AML/IE*. 2004-2018 Applied Measurements. Dostupné také z: https://appmeas.co.uk/products/lvdt-displacement-sensors/industrial-lvdt-displacement-sensor-aml-ie/#glance

[17] *R981/C981 System Camera: PRODUCT DESCRIPTION*. Mirion Technologies. 2008. Dostupné také z: https://www.mirion.com/products/cameras-for-extreme-environments/radiation-tolerant-cameras/r981-c981-system-camera/

[18] *High radiation inspection camera VT XLRAD PT: High radiation resistant camera with built-in lighting and pan/tilt capability*. DECRA-VISATEC. visatec GmbH • Gewerbepark

7 • 87477 Sulzberg • Tel. + 49 8376 9215 0 • Germany. Dostupné také z: https://www.dekra-visatec.com/en/cameras/high-radiation-inspection-camera-vt-xlrad-pt

[19] *FIEDLER: PT100-XM snímač teploty*. ©2017 FIEDLER AMS s.r.o. Elektronika pro ekologii - všechna práva vyhrazena. Dostupné také z: https://www.fiedler.company/cs/node/450

[20] TEP06 - měřící převodník pro 6 teplot: FIEDLER. ©2017 FIEDLER AMS s.r.o. Elektronika pro ekologii - všechna práva vyhrazena. Dostupné také z: https://www.fiedler.company/cs/produkty/ridici-jednotky-m4016/rozsirujici-moduly-pro-m4016/tep-08-mereni-teplot

[21] FIEDLER: TEP1 - snímače pro měření teploty vzduchu, vody, půdy. ©2017 FIEDLER AMS s.r.o. Elektronika pro ekologii - všechna práva vyhrazena. Dostupné také z: https://www.fiedler.company/cs/produkty/meteorologicka-cidla-senzory/teplota-tepelny-tok/tep01-teplotni-sonda

[22] IGLIDUR X: Kluzná pouzdra a vedení. 2018 HENNLICH. Dostupné také z: https://www.hennlich.cz/produkty/kluzna-pouzdra-a-vedeni-kluzna-pouzdra-iglidur-x-599.html

[23] VSK Profi, s.r.o.: Škrtící ventily V53 - oboustranné. 2018. Dostupné také z: https://www.vskprofi.cz/katalog/skrtici-ventily-v53

[24] SHIGLEY, Josep E. a Richard G. BUDYNAS. KONSTRUOVÁNÍ STROJNÍCH SOUČÁSTÍ. 2010, 1 186. Odborná literatura / Technická literatura / Strojírenství. ISBN ISBN 978-80-214-2629-0. Dostupné také z: http://www.shigley.cz

[25] ŠROUBOVÝ KATALOG: Obecné technické informace ke šroubům a spojovacímu materiálu. RECA spol s.r.o. 20 s. Dostupné také z: https://www.reca.cz/fileadmin/user_upload/cz.reca.com/cz/Documents/Sroubovy_katalog/technicke_info_2.pdf

[26] NEREZOVÁ OCEL 1.4301: NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL. Copyright INOX, spol. s r. o. 2018. Dostupné také z: http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html

[27] BRIOL spojovací materiály. Dostupné také z: https://www.briol.cz/produkty

[28] LOCTITE 2432 Low Halogen, Low Sulfur Medium Strength Blue Threadlocker. HENKEL. Dostupné také z: http://na.henkel-adhesives.com/product-search-1554.htm?nodeid=8797891690497&msdsLanguage=EN_US&selectedTab=technical

[29] Ketron® PEEK. QUADRANT. Dostupné také z: https://www.quadrantplastics.com/na-en/products/engineering-plastics/advanced-325-425-f/ketron-R-peek.html

[30] Parker Pneumatic: A complete range of system components. Catalogue PDE2600PNUK February 2016. 804 s. Dostupné také z: http://www.parker.com/Literature/Pneumatics%20Division%20Europe/PDE-Documents/General%20Catalogues/PDE2600PNUK_Parker_Pneumatic_Catalogue.pdf

[31] S520 SUBMERSIBLE IP68 350BAR LARGE ANGLE ROTARY SENSOR: POSITEK. POSITEK - LEADERS IN POSITION SENSORS. Dostupné také z: http://www.positek.com/index.php?route=product/product&product_id=186

[32] EL3104 | 4-channel analog input terminal -10…+10 V. BECKHOFF. Dostupné také z: https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el3104.htm

[33] MODBUS INTERFACE MODULE A PLC Interface Module for Orbit®3. Solatron Metrology. Dostupné také z: https://solartron.cdistore.com/datasheets/solartron/SolartronMODIM.pdf

[34] *LVDT Signal Conditioner | LVDT Amplifier*. APPLIED MEASUREMENTS LIMITED. Dostupné také z: https://appmeas.co.uk/products/instrumentation/lvdt-signal-conditioning-amplifier/

[35] KRUHOVÉ VEDENÍ: TYP HCR. HENNLICH. 2018. Dostupné také z: https://www.hennlich.cz/produkty/linearni-vedeni-valiva-motory-a-pohony-linearni-vedeni-valive-kruhove-vedeni-1186/typ-hcr.html

[36] PNEUMATIC ROTARY VANE AIR MOTORS - P1V-S SERIES / PARKER PNEUMATIC - EUROPE. Parker Hannifin Manufacturing Pneumatic Division Europe. 2018. Dostupné také z: http://ph.parker.com/us/en/pneumatic-rotary-vane-air-motors-p1v-s-series-parker-pneumatic-europe

SEZNAM PŘÍLOH

A VÝKRES HLAVNÍ SESTAVY 104

B OBRÁZKY NOVÉHO STENDU INSPEKCI 105

A VÝKRES HLAVNÍ SESTAVY

Tento výkres není součástí hlavního dokumentu, ale je přiložen k elektronické verzi práce jako samostatný soubor s názvem *Příloha_A.pdf*.

B OBRÁZKY NOVÉHO STENDU INSPEKCI

Tento výkres není součástí hlavního dokumentu, ale je přiložen k elektronické verzi práce jako samostatný soubor s názvem *Příloha_B.pdf*.