



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# KONSTRUKČNÍ NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠENÍ ZDVIHU A PŘÍTLAČNÉ SÍLY AKTUÁTORU

STRUCTURAL DESIGN OF TESTING FACILITY FOR ACTUATOR STROKE AND FORCE  
MEASUREMENT

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Zatloukal

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Horák, Ph.D.

BRNO 2020



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Tomáš Zatloukal**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Marek Horák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2019/20

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

## **Konstrukční návrh experimentálního zařízení pro zkoušení zdvihu a přitlačné síly aktuátoru**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Klíčovou funkcí kosmického tepelného spínače je sepnutí kontaktů a propojení dráhy přenosu tepla. Pohyb je vyvozen aktuátorem poháněným skupenskou přeměnou parafínu za současné objemové expanze. Zdvih a přitlačnou sílu aktuátoru je potřeba měřit v rámci vývoje projektu tepelného spínače.

### **Cíle bakalářské práce:**

- Konstrukční návrh zařízení pro experimentální ověření zdvihu a generované síly aktuátoru dle požadavků
- Výkresová dokumentace dílů, 3D model a seznam vybavení na objednávku
- Specifikace postupu měření a vyhodnocování měřených dat

### **Seznam doporučené literatury:**

MAŠEK, Jakub. Qualification Test of Heat Switch for Martian Conditions. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Strojního inženýrství, 2016, 129 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Robert Popela, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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



## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem zařízení pro zkoušky tepelného spínače. Zaměřuje se především na konstrukci, avšak nepomíjí ani potřebné měřicí vybavení, postupy měření a další specifikace.

První část práce popisuje požadavky kladené na vývoj experimentálního zařízení. Další část řeší výběr snímače polohy a snímače síly, součástí je rozsáhlá studie možností. Následný úsek práce pojednává o systému automatické regulace a měření teploty, uvádí potřebné parametry komponentů a navrhuje jejich implementaci.

Závěrečná část práce popisuje, jak se dospělo k navržené konstrukci zařízení. Nechybí pevnostní analýzy a postupy měření při tlakové a tahové zkoušce.

### Klíčová slova

Vesmírné aplikace, tepelný spínač, aktuátor, činný zdvih, přítlačná síla

## ABSTRACT

The bachelor thesis examines the design of testing facility for heat switch. It focuses mainly on the construction, but it does not omit the necessary measuring equipment, measuring procedures and other specifications.

The first part describes the requirements for the development of experimental facility. The next part deals with the selection of position sensor and force sensor, which includes an extensive study of possibilities. The following section deals with the automatically controlled heating system and temperature measurement, lists the necessary parameters of components, and proposes their implementation.

The final part of the thesis describes how to achieve to the structural design of the testing facility. There are also strength analyses and measurement procedures for pressure and tensile testing.

### Key words

Deep space applications, minimalized heat switch, actuator, active stroke, pressure force

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZATLOUKAL, Tomáš. *Konstrukční návrh experimentálního zařízení pro zkoušení zdvihu a přítlačné síly aktuátoru*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125335>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Marek Horák.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Konstrukční návrh experimentálního zařízení pro zkoušení zdvihu a přítláčné síly aktuátoru** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

*Datum*

---

*Jméno a příjmení*



## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Marku Horákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

**OBSAH**

ÚVOD .....	13
1 ESA – Evropská kosmická agentura.....	14
2 Kosmický tepelný spínač .....	15
2.1 Funkce kosmického tepelného spínače .....	16
2.1.1 Přenos tepla z teplého rozhraní na rozhraní studené .....	17
2.2 Konstrukce kosmického tepelného spínače .....	17
2.2.1 Aktuátor (silová řídicí jednotka).....	19
2.2.2 Tepelně vodivý plášť .....	21
2.2.3 Teplé rozhraní, studené rozhraní a izolační sloupky .....	22
2.3 Požadavky na tepelný spínač .....	24
3 Pracovní prostředí kosmického tepelného spínače .....	25
3.1 Kosmický prostor .....	25
3.2 Mars.....	25
3.2.1 Mise na Mars .....	26
4 Požadavky na vývoj experimentálního testovacího zařízení.....	29
5 Snímače vzdálenosti a polohy .....	31
5.1 Odporové snímače.....	31
5.2 Indukční snímače.....	32
5.2.1 Snímače na principu vířivých proudů .....	32
5.2.2 Magneto-indukční snímače .....	34
5.3 Kapacitní snímače .....	34
5.4 Optické snímače .....	35
5.4.1 Laserové snímače.....	35
5.4.2 Konfokální snímače.....	36
5.5 Lankové snímače.....	36
5.6 Volba snímače vzdálenosti a polohy .....	37
6 Snímače síly .....	38
6.1 Tenzometrické snímače .....	38
6.2 Piezoelektrické snímače .....	39
6.3 Volba snímače síly.....	39
7 Systém automatické regulace a měření teploty .....	41
7.1 DC relé CRYDOM D4D07 .....	42
7.2 Regulátor teploty Ht40P – TE – K0R - 000 .....	42
7.3 Rezistor R 8R TO220 35W 1% HITANO.....	43
7.4 DC napájecí zdroj Mc Voice.....	43
7.5 Teplotní sondy Pt 100: P0K1 – 202 – 3FW .....	43
8 Systém sběru dat ESAM Traveller 1 CF .....	45
9 Konstrukční návrh experimentálního testovacího zařízení .....	46
9.1 Rám .....	46
9.1.1 Horní kruhová deska .....	47

---

9.1.2	Dolní kruhová deska .....	48
9.2	Topné těleso .....	48
9.3	Stavěcí šroub .....	51
9.3.1	Jehly stavěcího šroubu .....	54
9.3.2	Pomocný člen vzorku .....	54
9.3.3	Příruba .....	55
9.4	Držák snímače polohy .....	56
9.5	Mezičlen pro zkoušku tahem .....	57
10	Specifikace postupu měření a vyhodnocování měřených dat .....	60
10.1	Zkouška tlakem .....	60
10.2	Zkouška tahem .....	61
	ZÁVĚR .....	62
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	69
	SEZNAM TABULEK .....	70
	SEZNAM PŘÍLOH .....	71



## ÚVOD

Novorozeně přijde na svět v momentě, když už mu začne být těsno v matčině lůně. Jakmile mu začne být těsné všechno oblečení a projde pubertou, stává se dospělým. Dospělý se stane cestovatelem tehdy, když pocítuje, že je mu těsné jeho rodné okolí nebo vlastní stát. Pouze ten, který má tento pocit i při pohledu na celou naši planetu, může být opravdovým kosmonautem a člověkem, kterého fascinuje vesmír, a tak má přirozenou chuť jej blíže poznat.

Podobně smýšlejících lidí přibývá, a proto začaly vznikat mnohé vesmírné agentury a organizace. Jednou z nich, je nám, jakožto občanům České a Slovenské republiky, velmi blízká Evropská kosmická agentura – ESA.

Může se to zdát, jako mikroskopický článek projektu. Projektu tak obrovského a složitého, který může mít kupříkladu podobu cesty na Mars. U takových cílů, je kladen velký důraz na spolehlivost a určitou předvídatelnost. Z těchto požadavků vznikají mnohé dílčí, avšak neméně důležité práce, jakožto i tato bakalářská práce, zabývající se návrhem experimentálního zařízení pro testování kosmického tepelného spínače.

Za slovem kosmický tepelný spínač se skrývají de facto dvě zařízení, a to mechanický termostat, který určuje stav, kdy je potřeba teplo odvádět a kdy ne, a zařízení, které tvoří cestu přenosu tepla ze zahřívaného zařízení do okolního chladného prostředí. Uplatnění kosmický tepelný spínač nenajde u automobilů ani domácností, jak je patrné ze samotného názvu tohoto zařízení. Ale v aplikacích vesmírných, kde se snížení hmotnosti hodí vždy. Proto je činnost termostatu a regulace teploty skryta v jedné součástce najednou.

Tepelný spínač už prošel dlouhým vývojem, avšak stále je co „ladit“. Jedním z důvodů může být to, že toto zařízení nevyužívá elektrickou energii, ale využívá pouze energii tepelnou a tu převádí na mechanickou, prostřednictvím vnitřní energie média umístěného uvnitř aktuátoru. Z toho vyplývá, že se jedná o zařízení tzv. autonomní.

Stále je snaha vymýšlet dokonalejší technické řešení, které vznikají na základě simulací a reálných měření. Což je také podstata této bakalářské práce. Naměřené hodnoty z provedeného testování na tomto zkušebním zařízení poslouží jako další materiál k dříve vyhotoveným výpočtům a jiným měřením.

## 1 ESA – Evropská kosmická agentura

Jak hlásá na svých webových stránkách, ESA je branou Evropy do vesmíru. Jejím posláním je rozvoj evropského kosmického programu a jistota, že investice do vesmíru mají své opodstatnění a z něj vyplývající výhody občanům Evropy i celého světa. [9]

ESA má statut mezinárodní vládní organizace. Vznikla na základě listiny nazvané Úmluva o založení Evropské kosmické agentury, jež byla podepsána 30.5.1975 v Paříži. Od 1.7.2015 stojí v čele generální ředitel Johann-Dietrich Wörner, který vystřídal v této funkci Jeana-Jacquese Dordaina. [10]

V této době ESA slučuje 22 členských států, mezi kterými je od 12.11.2008 i Česká republika, avšak spolupráce trvá už od roku 1998. Mimo členské státy spolupracuje s ESA také mnoho dalších států, na základě podepsaných dohod. V rámci těchto dohod o spolupráci se na celé řadě projektů podílí i mimoevropské státy, jakož například Kanada, Rusko a USA. Úzce také spolupracuje s Evropskou unií a ostatními kosmickými agenturami.

Ve Francii, konkrétně v Paříži, se nachází budova ředitelství. Mimo to, jsou po Evropě rozmístěna další významná pracoviště [11]:

- EAC, tato zkratka v překladu znamená Evropské středisko kosmonautů, jak už z názvu vyplývá, slouží jako školící středisko a základna pro kosmonauty. Nachází se v německém Kolíně nad Rýnem.
- ESAC, Evropské středisko nacházející se ve španělském Villanueva de la Canada nedaleko Madridu. Řeší se zde důležité náležitosti astronomických a planetárních misí.
- ESOC, středisko zabývající se zejména řízením družic a kosmických sond. Sídlí v německém Darmstadtu.
- ESRIN, středisko sloužící k sledování Země prostřednictvím družic. Také se zde nachází archiv o životním prostředí v Evropě. Nachází se v italském městě Frascati poblíž Říma.
- ESTEC, toto středisko najdeme v nizozemském městě Noordwijk a slouží pro výzkum a technickou přípravu projektů.
- GSC, kosmické centrum nacházející se na jihoamerickém kontinentu ve Francouzské Guyaně v pobřežním městě Kourou. Jeho poloha blízko rovníku je vhodná pro start nosných raket, a proto zde byl vybudován kosmodrom.
- Další pracoviště se nachází ve Velké Británii ve městě Harwell a mnoha dalších státech, v USA, Rusku, Belgii a například také v České republice v Praze, kde se nachází pozemní centrum zabývající se navigačním systémem Galileo (GNSS).

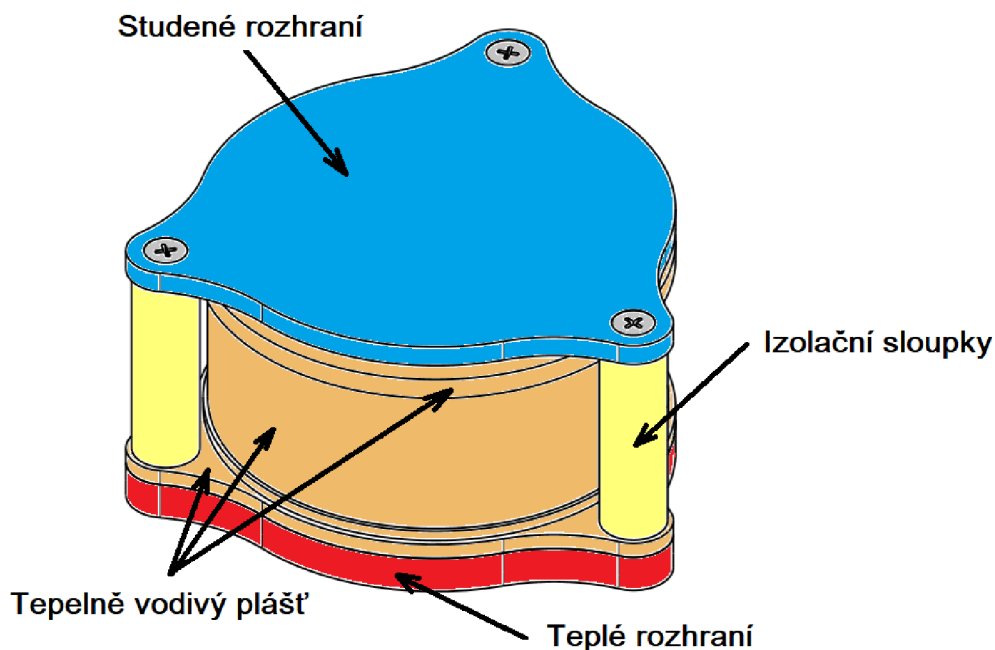
K výše zmíněným zájmům, poznamenaných u jednotlivých středisek, se ESA dále zabývá meteorologií, satelitní technologií a rozvojem nejen evropského průmyslu. Vynakládá snahu o prohloubení znalostí o Zemi, Sluneční soustavě a celém vesmírném prostoru.

## 2 Kosmický tepelný spínač

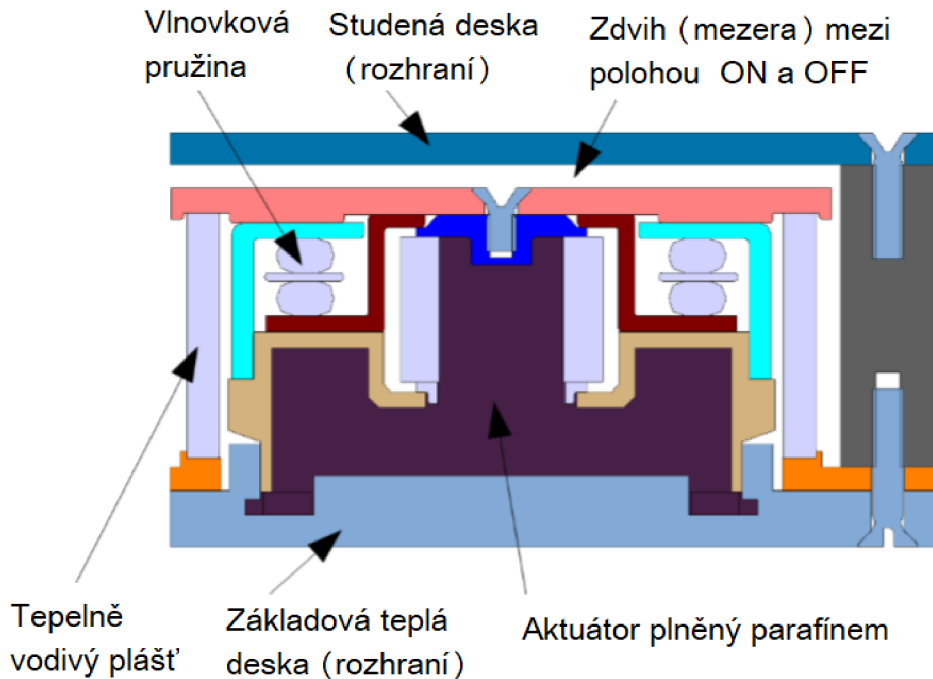
Evropská kosmická agentura (ESA) plánuje i v dalších letech pokračovat ve zkoumání Marsu, a proto je důležitý vývoj nových technologií a výrobků, které tento záměr usnadní. Miniaturní kosmický tepelný spínač (dále jen TS) byl vyvinut italskými společnostmi Aero Sekur S.p.A, později Arescosmo S.p.A, právě jako projekt ESA. Původně pro aplikaci v roveru pracujícím na povrchu Marsu, popř. pro kosmické sondy, zkoumající hluboký a chladný vesmír, avšak může najít uplatnění i v umělých družicích apod., jakožto součást systému řízeného přenosu tepla. [1][32]

Letecký ústav VUT v Brně byl v prvopočátku pověřen provedením zkoušek TS pro podmínky Marsu a celkově vesmíru, přesněji měřením tepelné vodivosti TS ve vakuu, což důkladně popsal Ing. Jakub Mašek ve své diplomové práci, měření probíhalo ve speciálně navržené tepelné vakuové komoře. V nynější době převzal letecký ústav kontrolu nad celým vývojem a testováním v rámci projektů a finanční podpory ESA.

Očekává se, že nové technologie pomohou při plnění vysokých požadavků na vesmírné aplikace. Tepelný spínač pracuje pouze mechanicky. Jeho jednoduchá, ale účelná konstrukce by měla zajistit dlouhou životnost, minimální nároky na údržbu, a tím pádem nízkou poruchovost. Stále podstatnější je také ekonomická stránka.



Obr. 1 Kosmický tepelný spínač



Obr. 2 Základní prvky kosmického tepelného spínače

## 2.1 Funkce kosmického tepelného spínače

Hlavní funkcí TS je automatická regulace teploty přístrojového prostoru (komponentu) určitého vesmírného zařízení, kterým, jak už bylo řečeno, může být například družice.

Použití TS může být výhodné u vesmírných zařízení, u kterého je dobré, zahříváný komponent tepelně oddělit od chladícího zařízení (popř. chladného vnějšího prostředí), aby se při poklesu teploty, ušetřila energie. Typická instalace TS je mezi tepelně zatíženým zařízením a chladičem.

Proměnná tepelná vodivost spínače je řízena spínací teplotou, což znamená, že TS nepotřebuje zdroj elektrické energie. TS má dva stavy: sepnutý (ON) a rozepnutý (OFF), přepíná se automaticky vlivem teploty na straně teplého rozhraní, resp. momentální teploty parafínu. TS je schopen poměrně přesně regulovat teplotu komponentů s nepřetržitým provozem, které jsou vystaveny extrémním výkyvům teplot okolního prostředí, jenž panují např. na povrchu Marsu. Je schopen udržovat teplotu v úzkém rozsahu tím, že spíná a rozpíná cestu přenosu tepla.

Hlavní činnost koná parafín, ten při změně teploty prodělává skupenskou přeměnu a v závislosti na tom i objemovou změnu. Spínací teplota se odvíjí od použitého parafínu a je mírně vyšší než jeho teplota tání, kdy přechází z pevného skupenství na kapalné. [39]

K snížení časové prodlevy aktuátoru při situaci, kdy má přejít TS ze stavu ON do stavu OFF, slouží vlnovkové pružiny.



### 2.1.1 Přenos tepla z teplého rozhraní na rozhraní studené

Přenos tepla probíhá vedením (kondukcí), což je jeden ze tří způsobů přenosu tepla (vedení, proudění, záření). Vedení tepla se vztahuje k látce, takže se může dít pouze mezi bezprostředně sousedícími částicemi hmoty. Kinetická energie neuspořádaného pohybu molekul se předává srážkami na sousední molekuly, a tak se přenáší tepelná energie. Vedení probíhá zejména v pevných látkách, ale i v kapalinách a plynech (především při vyloučení proudění). Přenos tepla vedením zvyšují volné elektrony. Tepelný tok při přenosu tepla vedením je popsán Fourierovým zákonem (pro 1D) [33]:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

$\dot{Q}$ [W], [J·s]	tepelný tok
$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti
$S$ [m <sup>2</sup> ]	plocha kolmá k tepelnému toku
$\partial T$ [K]	změna teploty
$\partial x$ [m]	elementární změna (směřující do míst s vyšší teplotou)

Součinitel tepelné vodivosti pevných látek  $\lambda = 0$  až 400 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>

Při důkladnějším výpočtu pomocí Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla (pro 3D model TS) jsou důležité také počáteční a okrajové podmínky. Mezi okrajové podmínky patří například rozložení teplot a druh styku dvou těles. V tomto případě styk mezi kontaktní plochou tepelně vodivého pláště a studenou deskou. Můžou nastat dvě situace:

- Dokonalý styk těles, kdy jsou teploty na povrchu obou těles stejné
- Nedokonalý styk těles, kdy jsou teploty povrchů těles různé. Důvodem je kontaktní tepelný odpor  $R_K$  [m<sup>2</sup>·K·W<sup>-1</sup>], jenž závisí na drsnosti povrchu, materiálu, tlaku mezi tělesy a druhu plynu v kontaktu.  $R_K$  bývá tabelován.[34]

Při rozepnutém stavu je teplo vedené pouze přes tři izolační sloupky TS, které mají velmi nízký součinitel tepelné vodivosti a malý kruhový průřez, což znamená, že TS v tomto stavu teplo téměř nevede. Tento stav nastává při teplotách základové desky pod spínací teplotou.

Jiná situace nastane při překročení spínací teploty, kdy dojde k sepnutí TS. Teplo je v tomto stavu vedeno přes celou konstrukci TS, zejména však přes měděný tepelně vodivý plášť aktuátoru, který zajišťuje dobrou tepelnou vodivost TS v tomto stavu.

## 2.2 Konstrukce kosmického tepelného spínače

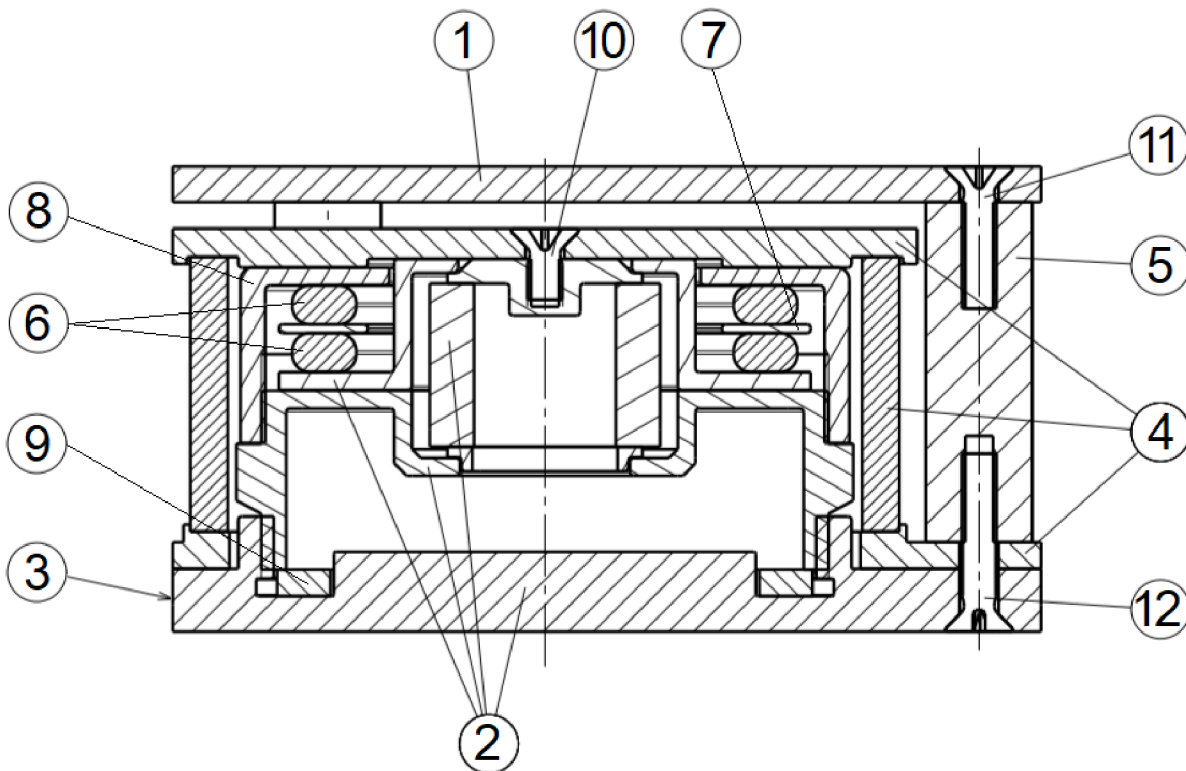
TS je zařízení, které v této době prodělává důležité úpravy konstrukce. Na vývoji se podílí jednak testování, a pak také moderní technologie, jako je například 3D tisk kovových dílů. Proto se následující popis konstrukce bude mírně lišit od konečné podoby TS.

Dle zprávy ESA musí tepelný spínač sestávat z teplého rozhraní, studeného rozhraní a spínacího zařízení, které slouží pro změnu tepelné vodivosti mezi

rozhraními. Dále je ve zprávě uvedeno, že tepelný spínač musí být samostatné zařízení připravené k montáži mezi jednotku a chladič. [6]

Tepelný spínač se skládá ze 3 hlavních částí:

1. Aktuátor (spínací zařízení)
2. Tepelně vodivý plášť
3. Teplé rozhraní, studené rozhraní a izolační sloupky



Obr. 3 Svislý řez tepelným spínačem

Tab. 1 Komponenty tepelného spínače

	Název komponentu	Počet kusů
1	Studená deska	1
2	Kompletní aktuátor *	4
3	Základová teplá deska	1
4	Tepelně vodivý plášť (svařenec)	1
5	Izolační sloupek	3
6	Vlnovkové pružiny	2
7	Ocelová podložka	1
8	Horní pouzdro vln. pružin	1
9	Teflonový těsnicí kroužek	1
10	Šroub M2x4 ISO 7046-2	1
11	Šroub M2x8 ISO 7046-2	3
12	Šroub M2x10 ISO 7046-2	3

\*Kompletní aktuátor sestává z vlnovce, těla aktuátoru, základové desky a dolního pouzdra vlnovkových pružin

### 2.2.1 Aktuátor (silová řídicí jednotka)

Aktuátor neboli spínací zařízení, se pohybuje pouze translačně v rozmezí pracovního zdvihu, tedy  $0 \text{ mm} \div 1,5 \text{ mm}$ . Max. hodnota zdvihu může být větší, dle výšky použitých izolačních sloupků, až  $2 \text{ mm}$ . Této pozice aktuátor dosáhne při spínací teplotě, která se liší v závislosti na použitém parafínu, jenž tvoří výplň aktuátoru, tedy výplň vlnovce, těla aktuátoru a základové teplé desky.

Pohyb aktuátoru, v rozmezí jeho zdvihu, se děje v průběhu změny teploty základové teplé desky zhruba o  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  (rozmezí od zdvihu  $0 \text{ mm}$  po sepnutou polohu). Stav, kdy hovoříme o sepnuté poloze, dosáhne v momentě, kdy síla působící na studenou desku přesáhne zhruba hodnotu  $500 \text{ N}$ . Pokud je aktuátor naplněn parafínem C16 a max. zdvih činí  $1,6 \text{ mm}$ , pak teplotní rozsah, při kterém se pohybuje od zdvihu  $0 \text{ mm}$  po sepnutou polohu činí zhruba  $15 \text{ }^\circ\text{C} \div 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Styk mezi kontaktní plochou teplotně vodivého pláště a studenou deskou (rozhraním) nastává při cca  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . [40]

#### Parafín

Požadovaný rozsah teplot, ve kterém se má daný zahříváný komponent vesmírného zařízení nacházet, závisí právě na použitém parafínu. Při dřívějším testování byly použity parafíny od firmy Sigma Aldrich s označením C16 a C15/16 (směs C15 a C16, poměr 1:1). Parafín C16 má teplotu tání  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  a C15/16 při  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  (C15 při  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

#### Vlnovec, tělo aktuátoru a dolní pouzdro pružiny

Vlnovec je tenkostěnná kovová trubička, jejíž stěny jsou příčně zvlněné, což umožňuje, že se může stlačovat a natahovat. Horní část je hermeticky utěsněna přivařenou přírubou, ve které je závit M2. Spodní část vlnovce je přivařena k tělu aktuátoru. Dolní pouzdro pružiny je taktéž spojeno svarovým spojem, a to k horní části vlnovce a jeho přírubě. Tento svařenec aktuátoru je po kontrole těsnosti naplněn parafínem a spojen závitem se základovou deskou. Takto vytvořená nádobka s parafínem je utěsněna teflonovým těsnicím kroužkem.

Kovové díly jsou z materiálu AISI 316L (ČSN 17 349, X2CrNiMo 17-12-2), jedná se o chromniklmolybdenovou nerezovou ocel, s obsahem legujících prvků: Cr  $16,5 \div 18,5 \%$ , Ni  $10 \div 12 \%$ , Mo  $2 \div 2,5 \%$ , C  $<0,03 \%$ . Je vysoce odolná vůči kyselinám jak organickým, tak i anorganickým. Vyznačuje se zvýšenou odolností vůči všem typům koroze, je také velmi dobře svařitelná. Materiál v okolí svaru si zachovává svou odolnost proti mezikrystalové korozi. [35][36]



Obr. 4 Rozpracovaný svařenec



Obr.5 Ustavení dolního pouzdra

### Vlnovkové pružiny a horní pouzdro pružiny

Dvě vlnovkové pružiny, mezi kterými je vložena ocelová podložka, se nachází v dutině kolem aktuátoru. Tato dutina je tvořena horním pouzdem pružiny a dolním pouzdem dutiny, které, jak už bylo zmíněno, tvoří svařenec aktuátoru, to znamená že se dolní pouzdro pohybuje během činného zdvihu s aktuátorem. Kdežto horní pouzdro pružiny se nepohybuje, jelikož je zašroubováno na těle aktuátoru. Během činnosti aktuátoru se vzdálenosti mezi vodorovnými plochami pouzder mění. Při nárůstu teploty, dochází k zmenšování vzdálenosti, a tím k stlačování tlačných vlnovkových pružin, které tím kladou mechanický odpor, tlumí zdvih aktuátoru a akumulují v sobě energii, která je důležitá při ději opačném. Tento opačný děj nastává, když teplota na základové desce klesne pod spínací hodnotu, což znamená, že je nutné, v co nejkratším čase TS rozepnout bez dlouhé prodlevy. Tuto prodlevu pružiny výrazně snižují a pomáhají tak samotnému aktuátoru oddálit plochu horní desky tepelně vodivého pláště od studeného rozhraní.

Horní pouzdro je vyrobeno z materiálu AISI 316L.



Obr. 6 Vlnovkové pružiny s podložkou



Obr. 7 Horní pouzdro



Obr. 8 Průžiny na dolním pouzdře

Obr.9 Zakrytované průžiny  
(+ základová deska)

### 2.2.2 Tepelně vodivý plášť

Tvoří tepelně vodivý obal aktuátoru. Jedná se o svařenec měděných dílů. Obvodová část je vyrobena z částečně pružného materiálu, konkrétně měděné pletené pásky, a to kvůli nutnosti pohybu horní desky v rozsahu činného zdvihu aktuátoru. Při aktuálním zdvihu 0 mm je páska stlačená a určitým způsobem zvlněná, při sepnuté poloze TS je napnutá a umožňuje tak krátkou cestu vedení tepla.

Desky a měděné opletení jsou svařeny laserovou technologií, což je z mechanického hlediska velmi dobré řešení, avšak musí být úspěšné také testy tepelné vodivosti. Konečné řešení se může lišit. Spodní deska přiléhá k základové desce. Horní deska je skrz otvor uprostřed spojena s horní přírubou aktuátoru šroubkem M2x4.

Jeho funkcí je přesně stanovit vodivou dráhu mezi teplou a studenou deskou, pokud je TS v poloze ON a přerušit tuto dráhu, když v poloze OFF.

Na díly je použita měď OFHC, tato anglická zkratka v překladu znamená, že měď má vysokou tepelnou vodivost a malý obsah kyslíku. V podstatě jde o čistou ušlechtilou měď s obsahem kyslíku nižším než 0,001 %.[4]



Obr.10 Tepelně vodivý plášť

### 2.2.3 Teplé rozhraní, studené rozhraní a izolační sloupky

Termínem teplé rozhraní je označována základová deska. Ta je vyrobena ze stejného materiálu jako tepelně vodivý plášť. Horní plocha základové desky tvoří dno nádoby s parafínem. V drážce je umístěn teflonový těsnicí kroužek, na který doléhá po zašroubování svařenec aktuátoru. Další funkcí je vedení tepla ze zahřívajícího vesmírného zařízení na plášť TS, toho je docíleno dostatečně velkou plochou ve styku s deskou tepelně vodivého pláště.

Základová deska, dolní deska tepelně vodivého pláště a tři izolační sloupky jsou spojeny šroubky M2x10. Sloupky mají kromě funkce konstrukční také funkci izolační, jsou vyrobeny z elastomeru. Ke druhé straně sloupek je uchycena šroubky M2x8 deska tvořící studené rozhraní, k němuž je připojen externí chladič. Při rozepnutém stavu TS, brání izolační sloupky vedení tepla z teplého rozhraní na studené rozhraní, na které, v závislosti na zástavbě TS, může působit velmi nízká vnější teplota.

Studená deska je ze slitiny hliníku s označením EN AW 7075 (AlZn5.5MgCu). Jedná se o slitinu používanou ve vytvrzeném stavu s vysokou mezí pevnosti: 460 MPa ÷ 540 MPa, nejvyšší  $R_m$  mají slitiny s dodatkovým označením -T6 a -T651. Je dobře obrobitelný. Vyznačuje se dobrou únavovou životností. Vlivem obsahu mědi má nižší odolnost vůči korozi, lze eloxovat, avšak obtížně.[37]



Obr. 11 Základová deska

#### Konstrukční problémy tepelného spínače

V sepnuté poloze síla od aktuátoru na studenou desku může při nedostatečné tuhosti způsobit její deformaci. Avšak deformována může být i teplá základová deska. Při těchto deformacích dochází ke zmenšení kontaktní plochy a v důsledku toho ke snížení množství odváděného tepla.

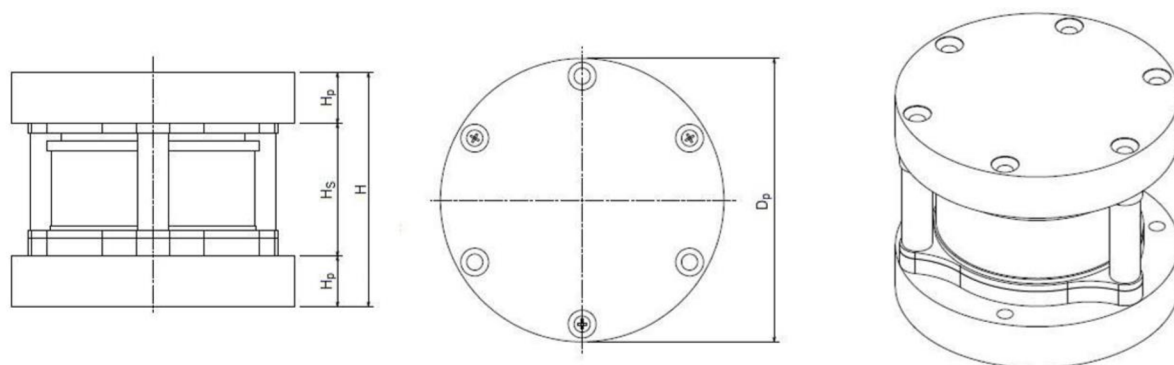
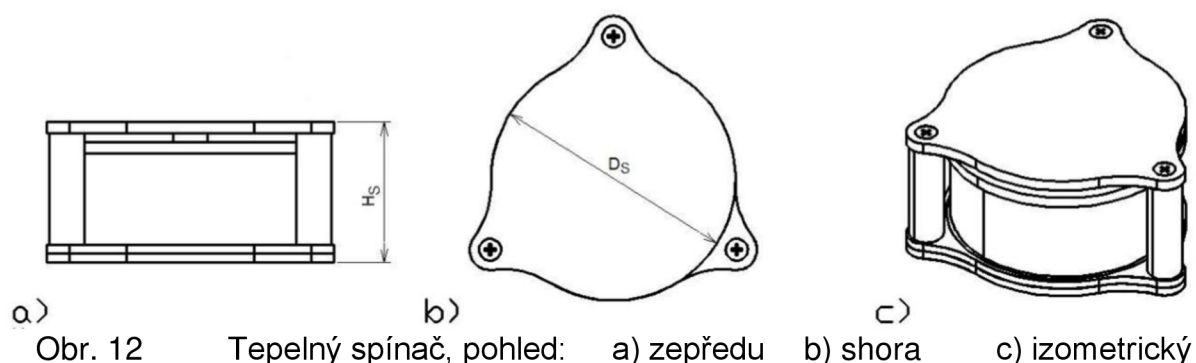
Problém s deformací základové desky je možné řešit dvěma základními způsoby modifikace. První spočívá v zesílení stávající konstrukce a použití kombinace měď-ocel. Druhý způsob je úprava celkové geometrie konstrukce a použití pouze mědi.[5]

Zjištění, jak velká může být síla vyvolaná aktuátorem, je jeden z cílů tohoto dokumentu.

TS nemá v současné době plně stanovenou konečnou podobu. U dřívější konstrukce se z důvodu nedostatečné tuhosti konstrukce TS, muselo na obě strany TS namontovat přídatné měděné desky. U první koncepce se měděné desky neuvažovaly, až později v průběhu vývoje.

Během dřívějšího testování se také vyskytly problémy s poklesem přitlačné síly od aktuátoru a náhlým snížením jeho zdvihu. Důvodem byl únik parafínu přes šroubové spojení základové desky a těla aktuátoru. Správné množství parafínu je důležité pro požadované parametry TS. Tento problém se podařilo úspěšně vyřešit. Důležité je pečlivé plnění aktuátoru požadovaným množstvím parafínu, který musí mít při plnění takovou teplotu (a tím objem), aby po uzavření aktuátoru základovou deskou nebyl přítomný vzduch v nádobce. [39]

Problém by také mohl nastat při dlouhodobém styku měděných částí se studenou deskou, vyrobenou z hliníkové slitiny, která může být negativně ovlivňována elektrochemickou korozí. Ta vzniká při kontaktu materiálů s rozdílnými el. potenciály ve vodivém prostředí (elektrolytu). [38]



Rozměry tepelného spínače:

$$D_s = 42 \text{ mm}$$

$$H_s = 26,2 \text{ mm}$$

$$A_s = 1564,53 \text{ mm}^2$$

$$S = 1,5 \text{ mm} \div 1,7 \text{ mm}$$

S přidavnými měděnými deskami:

$$D_p = 56 \text{ mm}$$

$$H_p = 8 \text{ mm}$$

$$A_p = 2463 \text{ mm}^2$$

$$H = 42,2 \text{ mm}$$

Průměr

Výška TS

Tepelně zatížená plocha (půdorys)

Max. zdvih

aktuátoru

Průměr Cu desky

Výška Cu desky

Plocha desky

Celková výška

## 2.3 Požadavky na tepelný spínač

Dle dokumentu ESA k předběžnému návrhu [6] jsou kladeny požadavky zejména na funkci a konstrukci. Dále také na styčné plochy (studené a teplé rozhraní) a na okolní prostředí, kterému musí odolávat. V neposlední řadě také specifikuje zkoušky, kterým musí vyhovět. Výpis těch nejdůležitějších:

- Aktuátor TS musí při sepnutí vyvinout sílu zhruba 500 N
- Tepelná vodivost v sepnuté (ON) poloze vyšší než 1 W/K
- Poměr ON/OFF vyšší než 100 (podíl hodnot tepelné vodivosti při sepnutém/rozepnutém stavu)
- Možnost provozu ve vakuu a v prostředí 10 mbar CO<sub>2</sub>
- Proměnlivý rozsah vodivosti spínače musí být mezi 15 °C ÷ 25 °C na teplé desce
- Spínač musí být navržen pro přenos tepelného výkonu 1 W ÷ 10 W v ON poloze s max.  $\Delta T=10$  K
- Spínač musí mít teplotní stabilitu  $\pm 1$  °C při konstantním příkonu a konstantní chladící teplotě
- V redundantní (přebytečné) konfiguraci musí být možné montovat 2 oddělené a identické spínače paralelně mezi zdroj tepla a chladič bez individuálního snížení výkonu
- TS musí mít ploché povrchy na teplé a studené straně pro montáž součástí sloužících k rozptylu tepla a pro chladič
- TS musí mít plochu pro montáž na teplou stranu zhruba 16 cm<sup>2</sup>
- TS musí splňovat požadavky na teploty na studené straně v rozmezí -125 °C ÷ 50 °C a na teplé straně v rozmezí -55 °C ÷ 60 °C
- TS musí být navržen a vyroben tak, aby vydržel -135 °C ÷ 70 °C
- TS musí mít celkovou hmotnost pod 90 gramů
- Provozní životnost delší než 7 let
- Konstrukce TS by měla umožnit změnu žádané hodnoty teploty pro sepnutí
- Požadavky na únavovou životnost a kontrola účinků koroze
- Požadavky na materiál částí a jejich konstrukci musí být dle zvláštních standardů ESA
- Porucha TS může nastat pouze v otevřené poloze a za všech okolností musí zůstat v této poloze OFF
- Konstrukce TS musí dovolit sterilizační proces mikrobiální redukcí suchým teplem při 125 °C po dobu 30 hodin
- TS musí být navržen tak, aby vydržel 100 000 cyklů ON-OFF
- Zkoušení TS 8 teplotními cykly s rozsahem teplot přes -125 °C ÷ 60 °C s dobou výdrže 1 hodinu na každém teplotním vrcholu
- TS musí být vystaven náhodným vibracím po dobu 2,5 min postupně pro jednotlivé osy
- Musí se změřit tepelný výkon TS
- Musí být provedena simulace velkých teplotních změn (tj. zvyšování/snižování aplikovaného tepelného zatížení)



### 3 Pracovní prostředí kosmického tepelného spínače

#### 3.1 Kosmický prostor

Kosmický prostor je označení prostoru ve vesmíru, kde se nenachází žádná atmosféra. Lze jej rozčlenit podle vzdálenosti od Země. Prostor od hranice zemské atmosféry (Karmanovy hranice), tedy 100 km, do vzdálenosti 2 mil. km můžeme označit pojmem prostor kolem Země, popř. okolní prostor či okolozemský prostor. Při vzdálenostech nad 2 mil. km se hovoří o vzdáleném kosmickém prostoru.

Kosmický prostor nelze považovat za prázdný, jakožto ve smyslu dokonalého vakua. Nachází se v něm vodíkové a heliové plazma, kosmický prach a různé formy kosmického záření, výjimkou není ani magnetické pole.

Základní teplota, stanovená díky měření kosmického záření, činí přibližně 2,7 K (-270,45 °C). Přesněji řečeno měřením pomocí infračerveného spektrofotometru, který je schopen měřit reliktní záření, což je záření elektromagnetické. Přichází ze všech směrů a s velkou pravděpodobností se jedná o záření, které bylo uvolněno během nedlouhé doby po velkém třesku.[8]

V zemské atmosféře atmosférický tlak postupně s výškou exponenciálně klesá, v nadmořské výšce 100 km je roven přibližně 0,32 Pa. V kosmickém prostoru je absolutní tlak roven 0 Pa. Z důvodu absence hmotných objektů je stejně tak, jako tlak i tření s okolním prostředím prakticky zanedbatelné.

#### 3.2 Mars

Mars je v pořadí vzdáleností od Slunce čtvrtou planetou sluneční soustavy. Tato vzdálenost činí 227,4 mil. km. Patří mezi tzv. terestrické planety, což značí pevný horninový povrch. Lidé jej pojmenovali Rudá planeta, kvůli, ze Země viditelnému, načervenalému zbarvení, za což mohou oxidy železa vyskytující se na povrchu. Je druhou nejmenší planetou sluneční soustavy po Merkuru, rovníkový průměr činí 6792,4 km. Kolem Marsu obíhají dva měsíce, a to Phobos a Deimos.

Gravitační zrychlení v rovníkové oblasti je přibližně 3,69 m/s<sup>2</sup>, to je pouze 37,6 % velikosti zemské gravitace. Za tento fakt může hmotnost planety, která je 0,107násobkem hmotnosti Země, tedy  $6,42 \cdot 10^{23}$  kg. Rotace kolem Slunce trvá 687 dnů, okolo své osy 24 h 39 min. Tato doba, se nazývá Sol, má stejný význam, jako u nás slovo „den“. Kvůli osovým odchýlkám lze na Marsu rozeznávat roční období, podobně jako na Zemi, ovšem s delšími intervaly, díky delšímu mart'anskému roku.

Stále probíhá zkoumání geologického složení planety. Není jisté, zda je jádro Marsu částečně tekuté nebo pevné.

Atmosféra má tlak 600÷1000 Pa, je tvořena zejména oxidem uhličitým (95,3 %), dále dusíkem (2,7 %), argonem (1,2 %), kyslíkem (0,13 %), oxidem uhelnatým (0,07 %), vodní párou (0,03 %) a oxidem dusnatým (0,01 %). Tenký plynný obal nechrání planetu před asteroidy a neakumuluje teplo od Slunce, proto je tak velký rozdíl denních a nočních teplot, tj. -87 °C ÷ 20 °C a kolísání během různých ročních období. Nové zkoumání ukázalo na podstatný vliv skleníkového efektu (způsobeno CO<sub>2</sub> a CO) s teplotním přírůstkem +5 °C a 30 % akumulace tepla. Absence ozonové vrstvy znamená všudypřítomné UV záření, které zapříčiňuje i vysoušení povrchu Marsu. Poněvadž je na Marsu nízký atmosférický tlak, nevyskytuje se na povrchu voda v kapalném stavu. Vědci věří, že dříve se zde nacházely řeky a oceány s vodou, zhruba před 4000 mil. let, když byla planeta teplejší, vlhčí a s hustší atmosférou. To znamená, že se voda na některých místech může nalézat pod povrchem ve formě ledu.

Jelikož nelze nulovou nadmořskou výšku vztahovat k hladině oceánu, jako je tomu na Zemi, musela se tato výška uměle definovat. Byl použit systém, který je vztahen k tlaku atmosféry. Výška, ve které je hodnota tlaku atmosféry rovna 610,5 Pa, je považována za nulovou nadmořskou výšku. Proto při popisu reliéfu Marsu je běžné použití záporných hodnot nadmořské výšky.

Na Marsu je rozmanitá topografie. Severní polokoule je převážně rovinatá, kdežto jižní polokoule je oblast velehor a kaňonů. Nachází se tu nejvyšší hora sluneční soustavy vulkanický Olympus Mous, s výškou přesahující 21 km. Jedno z nejhlubších míst, kolem -7 km, bylo objeveno v 4500 km dlouhém kaňonu Valles Marineris.

Většina povrchu je pokryta pískem a prachem, což často způsobuje lokální a globální prašné bouře. Rychlost větru v bouřích dosahuje více než 200 km/h. Prah zastíní sluneční svit na několik dní, až do té doby, co se velmi malé částice neusadí v řídké atmosféře za podmínek nízké gravitace.[7]

### 3.2.1 Mise na Mars

Existuje mnoho úspěšných projektů vesmírných misí mířících na oběžnou dráhu a povrch Marsu, avšak prozatím bez účasti člověka na palubě. Mezi organizace, které se touto tematikou zabývají dlouhodobě patří NASA (USA) a nynější Roskosmos (Rusko), ale připojují se další jako je ESA (Evropa) a ISRO (Indie).

Podle dostupných informací se v současné době na oběžné dráze Marsu nachází tyto aktivní sondující družice [17][18]:

- 2001 Mars Odyssey (24.10.2001)<sup>1</sup> – NASA [12]
- Mars Express (25.12.2003)<sup>1</sup> – ESA [13]
- Mars Reconnaissance Orbiter (10.3.2006)<sup>1</sup> – NASA [14]
- Mars Orbiter Mission (Mangalyaan) (24.9.2014)<sup>1</sup> – ISRO [15]
- MAVEN (22.9.2014)<sup>1</sup> – NASA [16]
- ExoMars – Trace Gas Orbiter (19.10.2016)<sup>1</sup> – ESA, Roskosmos [17]

Pokud se zaměříme na aktivní sondy, které byly navrženy pro průzkum přímo na povrchu Marsu, tedy rovery a stacionární moduly, nalezneme následující:

- Curiosity (6.8.2012)<sup>2</sup> – NASA [19]
- InSight (26.11.2018)<sup>2</sup> – NASA [20]

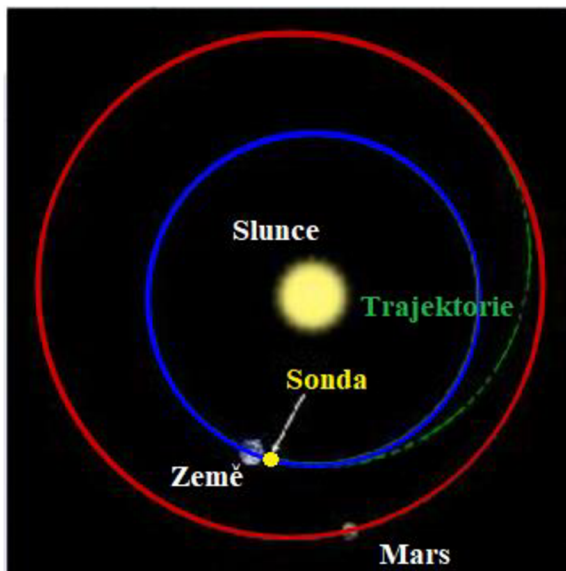
Při cestě ze Země na jakoukoliv jinou planetu je nutné řešit energetickou náročnost. S tím souvisí poloha těchto planet vůči sobě a trajektorie, která je zvolena. Energeticky nejvýhodnější jsou poloeliptické meziplanetární dráhy, při představě této pomyslné elipsy, pak její delší osa prochází Sluncem, které je jedním z ohnisek. Při návrhu trajektorie kosmických sond jsou zvoleny takové dráhy, které se téměř neliší od poloeliptických. Přeletové dráze, u níž je potřebná energie nejnižší, říkáme Hohmannova přechodová dráha. Má tvar poloelipsy, jenž je tečná k výchozí a cílové dráze ze stran od Slunce. [27][28]

Startovací okna letu k Marsu se opakují zhruba s periodou 780 dnů (2 roky, 2 měsíce). Ovšem podmínky pro přelet se každou tuto periodu mění. Důvodem je zejména proměnlivá vzdálenost mezi Zemí, Marsem a Sluncem. Dále fakt, že Mars se

<sup>1</sup> Datum dosažení požadované oběžné dráhy Marsu

<sup>2</sup> Datum přistání na povrchu Marsu

pohybuje po nezanedbatelné eliptické dráze v rovině, která se neshoduje přesně s dráhou Země. Optimální dráhy sondy lze rozdělit do dvou skupin: kratší než  $180^\circ$  a delší než  $180^\circ$ . Běžně se volí dráhy kratší, jedním z důvodů jsou např. nižší nároky na přesnost nastavení.[27]



Obr.14 Trajektorie letu k Marsu

### Mise ExoMars

Umělá družice Trace Gas Orbiter, která zkoumá atmosféru rudé planety patří k první části mise ExoMars, ta je projektem spolupráce ESA a Roskosmos. Součástí, níž byl i pozemní modul Schiaparelli, jenž měl za úkol průzkum povrchu v místě přistání. Během přistávacího manévru však řídicí jednotka nesprávně vyhodnotila data. V důsledku toho došlo k chybnému stanovení výšky a sonda Schiaparelli dopadla na povrch Marsu rychlostí 540 km/h, čímž došlo k rozsáhlému poškození. [18][19] Místo plánovaného přistání se nacházelo v oblasti Meridian Planum, dříve do této oblasti přistál i modul NASA s roverem Opportunity. Důvodem je rovinatý povrch, ale také to, že se zde nachází velké množství šedého krystalického oxidu železitého (minerál Hematit). Na Zemi se vyskytuje především v blízkosti termálních pramenů nebo ve stojatých vodách. Data získané vozítkem Opportunity potvrdila, že se v této oblasti dříve voda vyskytovala. [3][24]

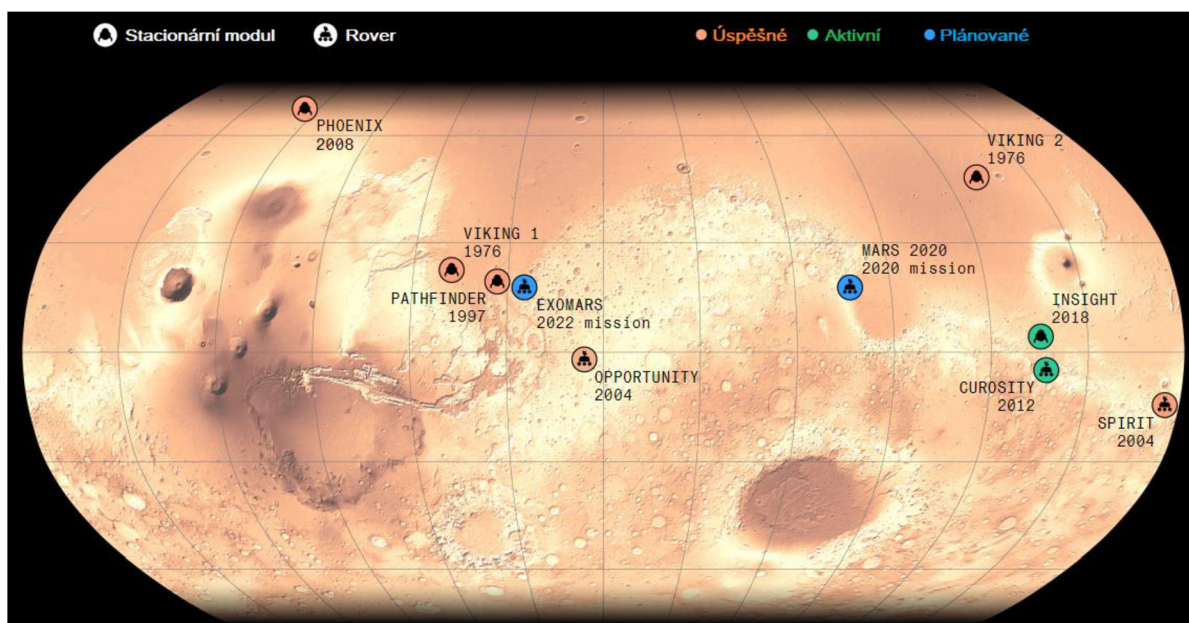
Druhá část mise je z různých důvodů odkládána. 12.3.2020 vydala ESA zprávu o odložení zahájení druhé části mise na rok 2022 (srpen–říjen), zejména kvůli potřebnému času na dokončení a testování s konečným hardwarem a softwarem. V této zprávě dále stojí, že obě strany, jak ESA, tak Roskosmos uznali, že je mise ohrožena i v důsledku zhoršení epidemiologické situace v Evropě. [20]

Plán druhé části mise počítá se startem z kosmodromu Bajkonur, nacházejícího se v Kazachstánu. Použita bude nosná raketa Proton-M (Roskosmos), která ponese šestikolový rover Rosalind Franklin (ESA) v přepravním modulu. Toto vozítko bude vysazeno pomocí přistávacího modulu Kazačok (Roskosmos), který bude následně sloužit jako povrchový stacionární modul k fotografování místa přistání, monitorování atmosféry a klimatu a měření radiace. [23][25]

Konstrukce roveru byla dokončena společností Airbus ve Velké Británii v srpnu 2019. Úspěšně prošel testy ve vakuu, problémy nastaly u nadzvukových padáků, které se trhaly. V současné době (březen 2020) probíhají závěrečné testy padáků v laboratoři NASA – Jet Propulsion Laboratory. Dokončené komponenty jsou testovány mimo jiné také na dynamické a tepelné zatížení. [20]

Při dodržení plánovaného datumu zahájení druhé části mise ExoMars, proběhne přistání na povrchu Marsu v období duben až červenec 2023. Dosedne do oblasti Oxia Planum, kde se nachází ložiska jílu, což by mohlo znamenat dřívější přítomnost vody na povrchu. Tato mise je zaměřena na průzkum atmosféry, monitorování povrchu a hledání možných mikrobů (mikroorganismů), ať už to živých či zkamenělých. Toto zkoumání bude možné provádět až do hloubky 2 m, díky hlubokovrtné soustavě, kterou je rover vybaven. [23]

Ostatní kosmické agentury se také aktivně zajímají o zkoumání Marsu. NASA plánuje v období startovacího okna 17.7. - 5.8.2020 vyslat k rudé planetě modul s šestikolovým roverem Perseverance v rámci mise Mars 2020, který bude mít podobné úkoly jako mise ExoMars.[28] Podle dostupných informací také čínská kosmická agentura CNSA plánuje využít tohoto startovacího okna a vyslat k povrchu Marsu sondu, která ponese také rover.[29][30]



Obr.15 Mise na Mars (vyjma neúspěšných a částečně úspěšných) [31]

## 4 Požadavky na vývoj experimentálního testovacího zařízení

Experimentální testovací zařízení (dále jen ETZ) bylo vyvinuto pro ověření některých požadovaných parametrů kosmického tepelného spínače a zjištění dosud neznámých charakteristik. Slouží k měření zdvihu aktuátoru, který se mění v závislosti na teplotě, dále pak k měření síly, kterou působí aktuátor na studené rozhraní kosmického tepelného spínače po sepnutí. Krom toho by měl poskytovat i širší využití.

Požadavky na ETZ vychází z předešlého vývoje a znalostí TS, avšak berou v potaz i další aspekty, které vychází najevo až v poslední době. Konstrukce a měřící zařízení ETZ musí zajistit, aby naměřené hodnoty měly určitou vypovídající hodnotu. Výsledek zpracování těchto dat, by měl být použitelný pro další zdokonalování tepelného spínače. ETZ bylo vyvinuto pro zkoušení vzorků, tj. tepelných spínačů, tepelně vodivých pláštů apod. [40]

### Požadavky na funkci

- Hlavní funkcí ETZ je měření zdvihu a přítláčné síly při určitém rozsahu teplot.
- ETZ musí být schopno měřit zatížení v tahu a tlaku.
- ETZ musí být samostatné, bez nutnosti připevnění k pracovní ploše (stolu).
- ETZ se musí skládat z jednotlivých částí (modulů), které se dají snadno měnit, kvůli rozdílným testovacím metodám, případně testování rozdílných vzorků.
- ETZ musí umožnit měření síly v obou normálových směrech (+/-) až do hodnoty 1000 N s přesností alespoň  $\pm 0,1 \%$ , tento požadavek se nevztahuje pouze na siloměr, ale na celé měřící zařízení. Při velkém silovém zatížení a teplotním zatížení mohou nastat deformace ETZ, ty však nesmí způsobit větší než přípustnou nepřesnost naměřené síly.
- Kvůli měření přítláčné síly v různých polohách aktuátoru, musí ETZ umožnit nastavení zdvihu  $0 \text{ mm} \div 2 \text{ mm}$  s přesností  $\pm 0,05 \text{ mm}$  a lepší, a to při teplotách  $20 \text{ }^\circ\text{C} \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$
- ETZ musí být schopno zahřívat vzorek v rozmezí teplot  $15 \text{ }^\circ\text{C} \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$  s přesností alespoň  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , pomocí manuálního nastavení výkonu v rozmezí  $1 \text{ W} \div 20 \text{ W}$  s přesností nastavené hodnoty  $\pm 0,01 \text{ W}$ .
- ETZ musí zajistit měření teploty vzorku v oblasti teplé styčné plochy v rozsahu  $15 \text{ }^\circ\text{C} \div 70 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- ETZ musí být schopno měřit vzorky do výšky 50 mm a průměru 80 mm. Tyto hodnoty jsou celkové rozměry soustavy tvořené TS a měděné desky s instalovanými termočlánky.

### Požadavky na konfiguraci a zástavbu

- ETZ musí umožnit měření vzorku i s instalovaným tepelně vodivým pláštěm a měření tuhosti samostatného tepelně vodivého pláště.
- Mezi TS a snímač zatížení musí být instalováno topné těleso
- ETZ musí umožnit instalaci jednoho měděného disku s implementovanými termočlánky.

### Požadavky na styčné plochy

- ETZ musí mít styčnou plochu pro upevnění vzorku rovinnou v horizontální rovině.
- Konstrukce styčných ploch musí umožnit jednoduchou výměnu vzorku.

- Styčné plochy nesmí negativně ovlivňovat přesnost měření. Připevnění zkoušeného vzorku (popř. sestavy s měděnými deskami) nesmí přinést další přídavné zatížení.
- Styčná plocha ETZ musí umožnit instalaci malých svorek (klipů) pro upevnění vzorku tepelně vodivého pláště.

### Požadavky na prostředí

- ETZ musí správně pracovat v laboratorních podmínkách s kontrolovanými veličinami: teplota  $22\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$  a relativní vlhkost  $55\% \pm 10\%$ .
- ETZ nesmí být citlivé na obvyklé vibrace způsobené člověkem, není však potřebný snímač vibrací.
- Přesnost měřícího zařízení by neměla být ovlivněna prostředím, při provozu mezi teplotami  $15 \div 35\text{ °C}$ , popřípadě ani při měření mimo kontrolovanou laboratoř.
- Redundantní teplo, uvolňované během průběhu měření vzorku nesmí mít vliv na přesnost a opakovatelné testování.

### Provozní požadavky

- ETZ musí mít snadný kalibrační proces
- Po přemístění celého ETZ nesmí být nutná dlouhá recalibrace.
- Modulární rekonfiguraci ETZ (např. výměna vzorku) musí být snadná a nevyžadovat recalibraci snímačů nebo rozebrání rámu. Změna nastavení testu a výměna vzorku pro různé druhy testování nesmí být komplikovaná.
- Je vyžadována automatická regulace vytápění (požadované teploty).

### Požadavky na konstrukci

- ETZ musí být vybaveno mechanismem pro vyvození tahové síly za současného měření vzdálenosti
- Vzorek se musí testovat ve svislé poloze.
- Celá sestava vzorku (TS, měděné disky s měřicími prvky, izolace, výhřevná deska s rezistory) musí mít hmotnost nižší než 1,6 kg ve všech konfiguracích.

### Požadavky na testování a ověření funkce

- Všechna data se zaznamenávají do systému sběru dat pro sledování, vyhodnocování a archivaci naměřených hodnot.
- Snímač zatížení (normálové síly = tah/tlak) musí mít nastavitelnou nulovou (prahovou) hodnotu, kvůli eliminaci tíhové síly působící na snímač zatížení od sestavy vzorku.
- ETZ musí prokázat splnění požadavků na něj kladených prostřednictvím kalibračního a testovacího procesu po prvním úspěšném sestavení.

### Záruka správně naměřených dat

- Musí být provedeno opakované měření.
- ETZ musí umožnit důkladný proces měření, vyhodnocení dat, spolehlivost a snadnou obsluhu.
- Konstrukce a provoz ETZ musí být v souladu s ECSS-E-ST-10-03C, ECSS-E-HB-10-02A a ECSS-E-ST-10-02C-Rev.1.

## 5 Snímače vzdálenosti a polohy

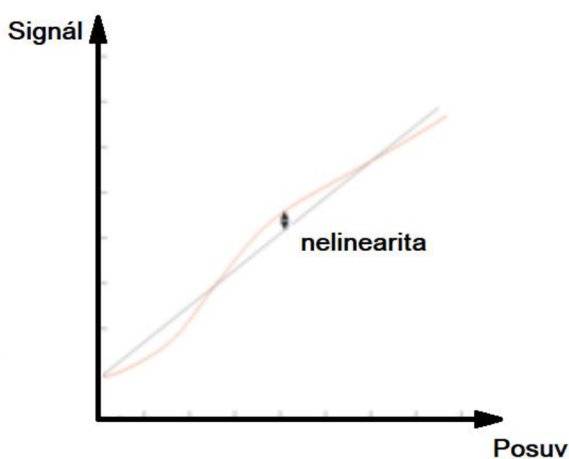
Na základě požadavků vztahujících se na měření zdvihu aktuátoru byla provedena analýza možných řešení. Hlavní roly zde hrají tyto aspekty: přesnost a rozsah měřených hodnot, provozní podmínky a umístění snímače, tudíž jeho zástavbové rozměry a doporučené upevnění. Dále pak požadavek na použití snímače, který umožňuje připojení k běžně používaným ústřednám a převaděčům signálu na Leteckém ústavu VUT v Brně.

U jednotlivých základních typů snímačů je použito specifické názvosloví. Měřící rozsah udává vzdálenost (prostor), ve kterém se může měřený objekt nacházet, aby byl snímač schopen identifikovat jeho polohu a splnit udávané technické parametry. Rozlišení popisuje nejmenší možnou měřitelnou změnu polohy, kterou lze spolehlivě snímačem měřit. Nelinearita, v některé literatuře označovaná jako linearita, je max. odchylka skutečné charakteristiky závislosti výstupního signálu snímače na posunu měřící sondy (objektu) od ideální lineární charakteristiky. Rozlišení a nelinearita jsou

udávány většinou v procentech měřícího rozsahu (% m.r.), popřípadě v délkových jednotkách.

Přesnost snímačů, která vyjadřuje max. chybu naměřené hodnoty oproti skutečné, závisí na širokém spektru faktorů, jimiž jsou zejména nelinearita, rozlišení, teplotní stabilita, dlouhodobá stabilita a statistické chybování.

Výrobci snímačů uvádí i další parametry, jako je kupříkladu přenosová rychlost a časová odezva, tyto údaje hrají větší roly spíše u dynamické změny polohy.



Obr.16 Nelinearita snímačů

### 5.1 Odporové snímače

Princip odporových neboli potenciometrických snímačů je založen na změně odporu při pohybu jezdc, který musí být v kontaktu s měřeným objektem. Odporová dráha bývá tvořena vinutým drátem, ale postupně se přechází na vodivý plast. U vinutých potenciometrů je rozlišení nižší, kvůli skokové změně odporu při pohybu jezdc mezi sousedními závity vinutí.

Existují varianty bez vratné pružiny nebo s ní. Ta zaručí, že je jezdec stále v kontaktu s měřeným předmětem, avšak způsobí vznik přidavné síly. U variant bez vratné pružiny se většinou spojení mezi jezdcem a předmětem provede pomocí závitu nebo kloubového oka.

Výhodou je nízká cena a dobrý poměr cena/výkon. Nevýhodou je však horší přesnost měření při vibracích. Výrobci nabízí snímače pro měřící rozsahy od jednotek milimetrů do jednotek metrů. Uváděná nelinearita činí  $\pm 0.04$  % m.r. až  $\pm 0.7$  % m.r., rozlišení až 0,01 mm, běžně udávaná provozní teplota  $-30$  °C ÷  $100$  °C. [50]

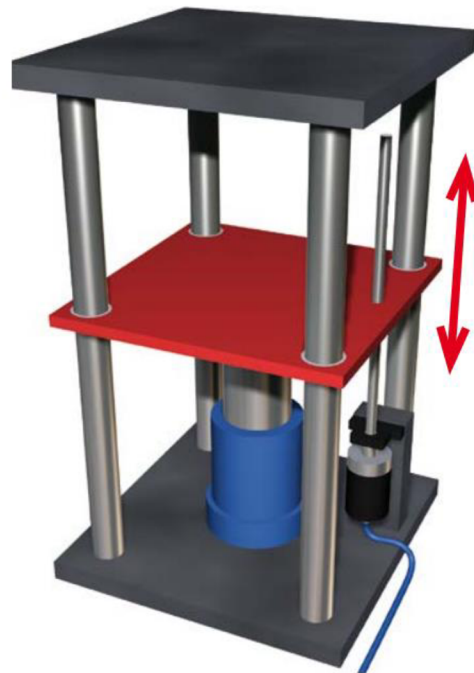


Obr.17 Potenciometrické snímače CLP21 firmy Megatron [50]

## 5.2 Indukční snímače

Indukční neboli induktivní snímače se řadí mezi bezdotykové snímače. Existuje celá řada modifikací, které však využívají podobného principu. Většina pracuje s tzv. LVDT, což je typ transformátoru. Sestává z jedné primární cívky, dvou sekundárních a válcového feromagnetického jádra, které se při měření posouvá, což způsobí změnu indukčnosti. Jádro může být volné, s vestavěnou pružinou nebo např. průchozí (viz. obr 126).

V porovnání s potenciometrickými snímači jsou více odolné vůči vibracím a rázům. Jsou schopny provozu v prašném i vlhkém prostředí díky celkovému zakrytování měřícího senzoru. Vyrábí se pro rozsahy od jednotek milimetrů po jednotky decimetrů. Některé typy jsou schopny měření při teplotním rozsahu  $-35\text{ °C} \div 120\text{ °C}$ . Nelinearita se pohybuje kolem  $<\pm 0,5\%$  m.r., popř  $<\pm 0,25\%$  m.r..[48]



Obr. 18 Jedna z možných konstrukcí a umístění indukčních snímačů [49]

### 5.2.1 Snímače na principu vířivých proudů

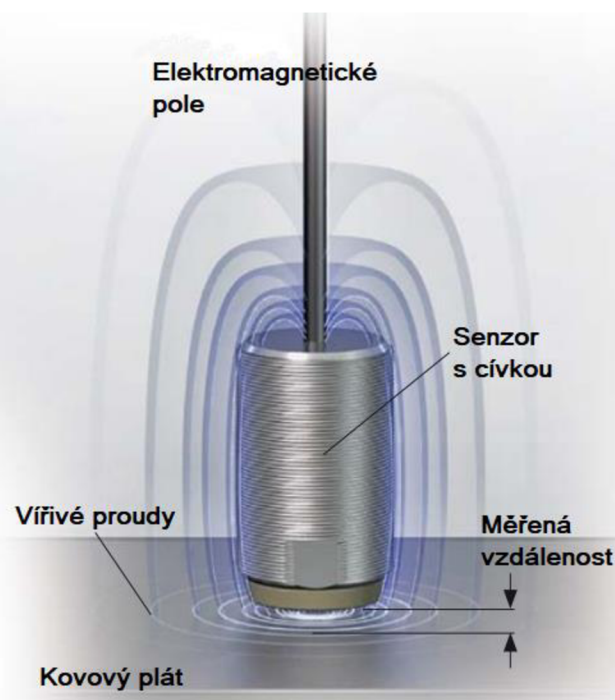
Snímače využívající vířivých proudů se řadí mezi indukční snímače. Zajišťují bezkontaktní měření s vysokou přesností i v těžkých provozních podmínkách.



Existuje rozdělení těchto snímačů na vazební a nevazební. Nevazební typ je více citlivý na kovové předměty nacházející se po stranách koncového senzoru. Koncová část snímače, přivrácená k měřenému objektu by neměla mít po obvodu ve stanovené délce žádný předmět, který by jeho funkci ovlivňoval. V případě, že se tomuto konstrukčnímu řešení nelze vyhnout je nutná zásadní kalibrace snímače ve výrobním podniku, popř. u uživatele.

Na rozdíl od klasických indukčních snímačů na bázi LVDT, nejsou snímače fungující na principu vířivých proudů ovlivňovány magnetickým polem. Avšak i u těchto snímačů může docházet k tomu, že magnetické pole změní vlastnosti měřeného objektu, a tím nepřímo negativně ovlivňovat měření.

Udávané měřicí rozsahy těchto snímačů se nacházejí mezi hodnotami  $0,4 \text{ mm} \div 80 \text{ mm}$ , rozlišení mezi  $0,1 \text{ \% m.r.} \div 0,005 \text{ \% m.r.}$ , nelinearita v rozmezí  $\pm 0,2 \text{ \% m.r.} \div \pm 0,7 \text{ \% m.r.}$ , provozní teploty se mohou pohybovat v širokém rozsahu od  $-40 \text{ }^\circ\text{C} \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . [47][48]



Obr. 19 Princip snímače využívajícího vířivých proudů [47]



Obr. 20 Snímač vazební (vlevo) a nevazební (vpravo) [46]



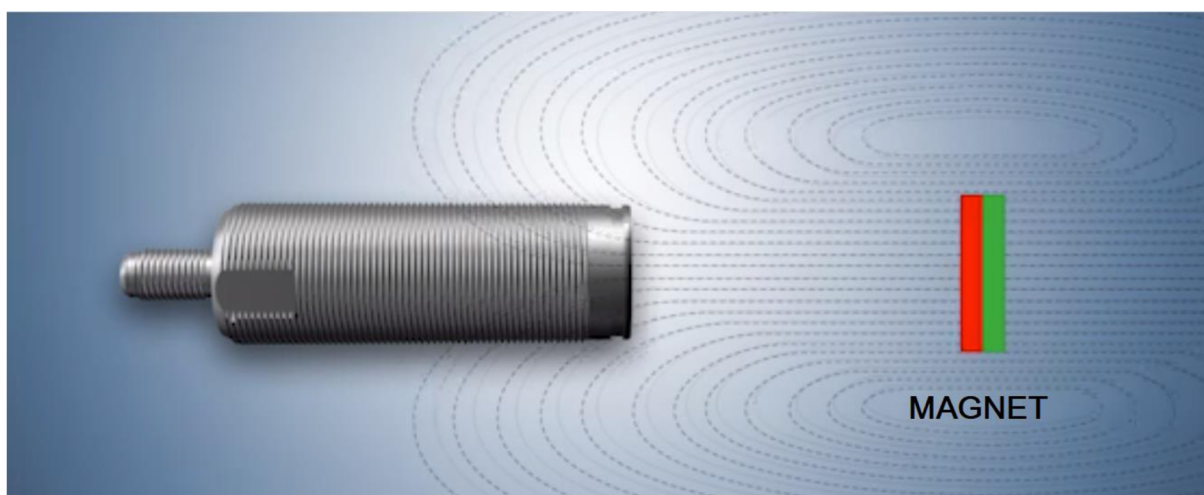
Obr. 21 Zástavba nevazebního snímače na principu vířivých proudů [48]

### 5.2.2 Magneto-indukční snímače

Magneto-indukční snímače spojují výhody indukčních a magnetických snímačů. Ostatní magnetické snímače jsou vhodné spíše pro měření větších vzdáleností, standardně až 50 metrů, měření otáček apod.

Naměřená hodnota odpovídá vzdálenosti mezi sondou snímače kruhovým magnetem, který se nachází na zkoumaném objektu. Díky tomuto principu je snímač schopen správně měřit i v případě, že je mezi sondou a magnetem nemagnetický materiál. Snímač může být díky tomu namontován bezpečně i v těžkých provozních podmínkách.

Snímač lze montovat do nemagnetických předmětů, ve kterých může být zapuštěn nebo vyčnívat, a to bez ovlivnění přesnosti měření. V závislosti na použitém magnetu, zejména jeho velikosti, se pohybuje měřicí rozsah od 20 mm do 55 mm. U běžných snímačů tohoto typu se rozlišení pohybuje okolo  $<0,05$  % m.r., nelinearita  $\pm 3$  % m.r. a jsou schopny provozu při teplotách  $-20$  °C  $\pm$   $80$  °C. [45]



Obr. 22 Magneto-indukční snímač [45]

### 5.3 Kapacitní snímače

Kapacitní snímače jsou určeny pro bezkontaktní měření vzdálenosti a polohy elektricky vodivých objektů v čistém prostředí, nejlepší přesnost mají ve vakuu. Vyrábí se nejčastěji v konfiguraci, kdy sonda snímače tvoří jednu elektrodu a měřený objekt druhou. Měří se změna kapacity takto vytvořeného kondenzátoru. Změnu kapacity je možno vyvolat změnou vzdálenosti elektrod, změnou plochy elektrod nebo změnou parametrů dielektrika mezi elektrodami.

Často používané jsou snímače využívající změnu vzdálenosti elektrod. Základem je ideální deskový kondenzátor, kterým protéká konstantní střídavý proud, amplituda střídavého napětí na snímači je úměrná vzdálenosti mezi elektrodami kondenzátoru.

Velkou výhodou je poměrně jednoduchý a velmi přesný princip měření, avšak při nutnosti měření v čistých prostorách. Měřicí rozsahy se pohybují od 0,05 mm po 10 mm, rozlišení od 0,01 % m.r. po 0,00008 % m.r., linearita od  $\pm 0,05$  % m.r., popř  $\pm 0,025$  % m.r.. [43]



Obr. 23 Některé typy konstrukcí kapacitních snímačů [43]

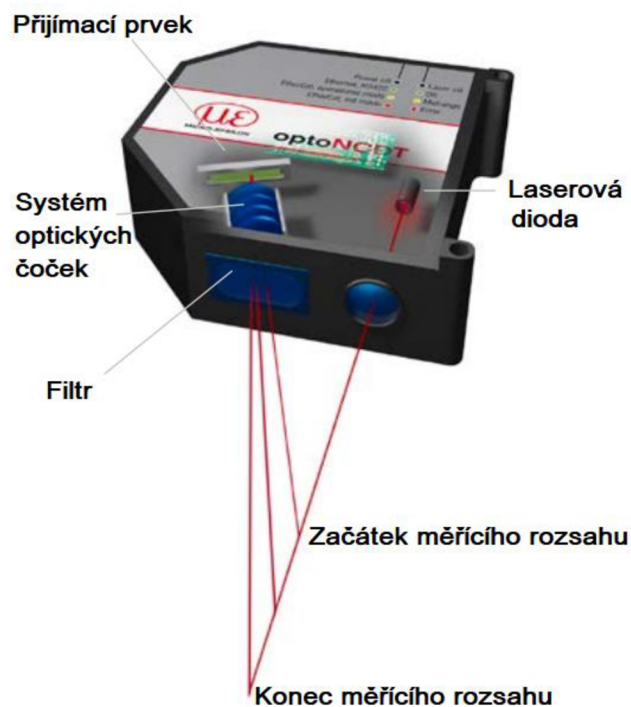
## 5.4 Optické snímače

V dnešní době je měření vzdálenosti a polohy stále častěji řešeno pomocí optických snímačů. Patří mezi bezkontaktní snímače, jenž se vyznačují výbornou přesností a poměrně malými rozměry.

### 5.4.1 Laserové snímače

Laserové snímače mohou pracovat např. na triangulačním principu. Snímač vyzařuje světelný paprsek pomocí laserové diody. Tento paprsek je namířen na plochu měřeného objektu, od které se odráží a dopadá na optický prvek snímače, citlivý na polohu dopadu tohoto vracejícího se paprsku, ze které je následně vyhodnocena vzdálenost snímače od měřeného objektu. Tímto způsobem lze měřit i vzdálenost od lesklých povrchů.

Mezi výhody těchto snímačů lze zařadit jejich necitlivost vůči elektromagnetickému poli, možnost rozlišování barev a také snadné nastavení, díky viditelnému paprsku. Laserové snímače jsou vyráběny s měřicími rozsahy od 2 mm do 1000 mm, s rozlišením od 0,005 % m.r. po 0,0015 % m.r. a nelinearitou  $\pm 0,3 \% \text{ m.r.} \div \pm 0,02 \% \text{ m.r.}$  [44]



Obr. 24 Princip laserového snímače [44]

### 5.4.2 Konfokální snímače

Konfokální snímače se také řadí do skupiny optických bezkontaktních snímačů, tyto jsou schopny měření vzdálenosti, polohy i tloušťku transparentních materiálů, jimiž je schopno procházet určité spektrum světla. Pokud je materiál složen s více vrstev s odlišným indexem lomu, pak je možno jednou sondou změřit tloušťku až 6 vrstev.

Měřicí část snímače tvoří soustava optických čoček zaostřených na různou vzdálenost. Tato soustava rozkládá bílé polychromatické světlo na monochromatické světlo různých vlnových délek. Spektrální analýzou odraženého světla v kontroléru je vypočítána vzdálenost měřeného objektu. Měřicí rozsah se pohybuje od 300  $\mu\text{m}$  do 30 mm, nelinearita činní při měření vzdálenosti  $<\pm 0.3 \mu\text{m}$  až  $<\pm 20 \mu\text{m}$ , při měření tloušťky až  $<\pm 40 \mu\text{m}$ , rozlišení od 3 nm po 250 nm, jsou použitelné při teplotách  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$   $\div 70 \text{ }^\circ\text{C}$

Tělo snímače se vyrábí v různých provedeních s axiálním i radiálním směrem měření. Nejmenší sondy s měřicím rozsahem 3,5 mm mají průměr již od 4 mm, čímž je možné měřit v omezeném prostoru, v dírách a mezerách. Měřicí paprsek může být úzký a s malým kontaktním bodem. Proto se konfokální snímače mohou používat pro mapování jemných povrchových struktur. [41][42]



Obr. 25 Radiální (nahore) a axiální (dole) konfokální snímač [42]

### 5.5 Lankové snímače

Jedná se o jednoduché, avšak někdy opomíjené řešení. Princip spočívá v měření otáček cívky, na které je navinutu tenké lanko. Důležitou součástí je vratná pružinka, která zajišťuje správné navíjení lanka zpět a udržuje jej v napnutém stavu. Měření otáček cívky bývá řešeno pomocí potenciometru, kde je výstupní hodnotou odpor, jenž je tedy závislý na délce vysunutého lanka, popř. pomocí enkodéru.

Určitou výhodou je možnost měření ve špatně přístupných místech, kde můžeme pro vedení lanka použít i kladek. Uplatňují se spíše v aplikacích, kde nejsou kladeny velké nároky na přesnost měření. Vyrábí se s měřicími rozsahy od 50 mm až do několika metrů. Nelinearita se pohybuje od  $\pm 0,2 \%$  m.r. do  $\pm 0,01 \%$  m.r.. [51, 52]



Obr. 26 Lankové snímače [53]

## 5.6 Volba snímače vzdálenosti a polohy

Při výběru vhodného snímače polohy bylo nutné zvážit celou řadu aspektů, mimo jiného i cenovou nabídku. Původně bylo zamýšleno při tlakových zkouškách umístit snímač do dutého stavěcího šroubu ETZ. Avšak kvůli finanční náročnosti snímače, který by díky svým rozměrům vyhovoval, je toto řešení nedosažitelné.

Zástavbové řešení snímače nad pohybovým šroubem umožňuje vybrat odporový snímač, jenž je finančně přijatelnější, avšak jeho přesnost měření se pohybuje na hranici kladeného požadavku.

Navržené umístění tohoto snímače polohy a princip měření ve spojení s volnou jehlou stavěcího šroubu má však výhodu – ke všem typům prováděných zkoušek postačuje pouze jeden snímač

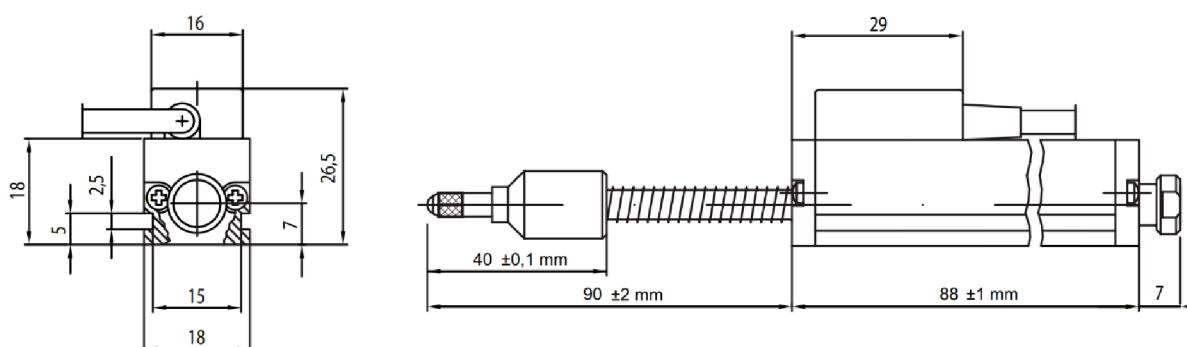
### Snímač Megatron SPR 18-50 – K

Jedná se o odporový snímač s vratnou pružinkou, jeho odporovou dráhu tvoří vodivý plast, což zaručuje téměř nekonečné rozlišení. Snímač je opatřen kabelem o délce 1 m. Cenová nabídka platná do 15.7.2020 uvádí cenu celkem bez DPH 6 796 Kč.

Tab. 2 Specifikace snímače Megatron 18-50 – K [54]

Měřicí rozsah	50 ±1 mm
Nelinearita	±0,1 %, resp. ±0,05 mm
Rozlišení	<0,1 mm
Doporučený proud jezdce	<1 μA
Jmenovitý výkon při 40 °C	≤0,75 W
Životnost (pohyby hřídele)	40 mil.
Max. rychlost pohybu jezdce	5 m/s
Provozní síla	<3 N
Provozní teplota	-30 °C ÷ 105 °C
Třída krytí*	IP40 (volitelně IP54)
Hmotnost	Cca 150 g

\*krytí elektrických zařízení (zabezpečení vůči vodě, dotyku, vniknutí cizího předmětu)



Obr. 27 Snímač polohy Megatron SPR 18-50 – K [54]

## 6 Snímače síly

Na základě požadavků kladených na ETZ je nutné vhodně vybrat i snímač síly, přesněji snímač síly tlakové a tahové.

Mírou velikosti síly je velikost deformace pružné části snímače síly, tato deformace je lineární a popisuje ji Hookův zákon.

Snímače síly můžeme rozdělit na elektrické a mechanické. Mezi mechanické snímače síly patří: pákové, pružinové a hydraulické. Avšak pro jednodušší zástavbu a nutnost měřit tlakovou i tahovou sílu je vhodnější pro účely ETZ použít elektrický snímač síly.

Elektrické snímače síly se dělí na odporové (tenzometrické, se stykovým odporem, aj.), indukční, magnetické, kapacitní a piezoelektrické. Pro přesné měření síly se v dnešní době používají zejména tenzometrické a piezoelektrické snímače. U obou těchto typů snímačů jsou uváděny podobné hodnoty přesnosti měření a široké spektrum rozsahů.

### 6.1 Tenzometrické snímače

Tenzometrické snímače patří mezi nejpoužívanější snímače pro měření tahové a tlakové síly. Obvykle použité elektrické tenzometry tvoří pasivní elektrotechnickou součástku k nepřímému měření normálového napětí. Moderní snímače obsahují tenzometry odporové nebo polovodičové.

Přesnost měření je značně ovlivněna mnohými vlivy. Teplota má vliv na vodivost materiálu tenzometru a teplotní roztažnost. Proud tekoucí tenzometrem musí být dostatečně malý, aby se tenzometry pouze zanedbatelně zahřívaly.

Dalším aspektem je hystereze. Samotný tenzometr má nízkou hysterezi, větší má obvykle materiál, na kterém jsou tenzometry nalepeny.

Jedním z dalších negativních vlivů může být elektromagnetické vlnění.



Obr. 28 Tenzometrické snímače taho-tlakové síly firmy HBM různých provedení [55]

## 6.2 Piezoelektrické snímače

K měření síly využívají piezoelektrický jev. Při mechanickém zatížení vzniká na povrchu krystalů elektrický náboj, jeho velikost je následně převáděna na hodnotu působící síly. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti síly. Závislost je lineární, při nulové působící síle je i velikost elektrického náboje nulová. [62]

V dnešní době se u snímačů piezoelektrických využívají k měření krystaly křemene nebo také materiály na bázi titaničitanu barnatého, popř. Seignettovy soli (tetrahydrát vinanu draselno-sodného). [62]

Tento druh snímačů síly lze použít jen pro měření tlakové síly.



Obr. 29 Piezoelektrický snímač síly firmy HBM [63]

## 6.3 Volba snímače síly

Na základě požadavků byl pro ETZ zvolen snímač síly tenzometrický od firmy GTM ze série KS.

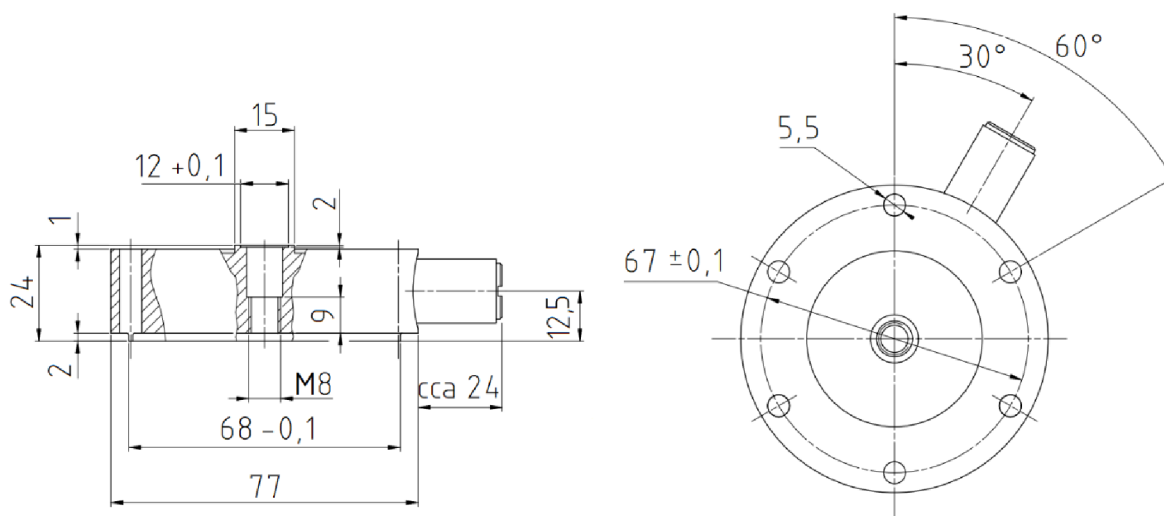
### Snímač GTM série KS 2,5 kN

Tento snímač slouží pro měření statické i dynamické síly v tahu a tlaku. Má neomezenou mez únavy při provozním zatížení do  $\pm 80$  % jmenovitého zatížení. Lze volit mezi variantou s pevným kabelovým připojením (délka kabelu 5 m) nebo připojení konektorem. Výrobce nabízí i variantu s rozšířeným provozním teplotním rozsahem.

Tab. 3 Specifikace snímače GTM série KS 2,5 kN [56]

Jmenovité zatížení tah/tlak	2 500 N
Třída přesnosti	0,02
Chyba linearity	0,02 %
Chyba interpolace	0,4 %
Hystereze	0,02 %
Vliv excentricity působící síly	0,015 %/mm
Jmenovitý rozsah napájecího napětí	5 V ÷ 20 V

Třída krytí	IP50 – konektorové připojení IP67 – pevné připojení kabelu
Průhyb při jmenovitém zatížení	0,05 mm
Tuhost	35 kN/mm
Hmotnost	0,5 kg
Vlastní frekvence	8 kHz
Dovolené přetížení	±150 %
Dovolená excentricita působení namáhání	10 mm
Dovolený rozsah teplot	10 °C ÷ 60 °C (zákl. verze)
Bezpečný rozsah teplot	-40 °C ÷ 120 °C



Obr.30 Snímač síly GTM série KS 2,5 kN [56]



## 7 Systém automatické regulace a měření teploty

Tento systém se nijak zvlášť neliší od konečné podoby systému automatické regulace teploty používaném ve vakuové komoře, níž konstrukcí se zabýval Ing. Jakub Mašek.

Systém automatické regulace a měření teploty sestává z:

- DC relé CRYDOM D4D07
- Regulátor teploty Ht40P – TE – K0R – 000
- Rezistory R 8R TO220 35W 1% HITANO
- DC napájecí zdroj
- Teplotní sondy Pt 100: P0K1 – 202 – 3FW
- Voltmetr a ampérmetr

Regulátory teploty spínají a rozepínají obvod s ohledem na požadovanou teplotu, resp. zapínají a vypínají příkon, který prochází přes DC relé s proměnnou frekvencí, ta závisí na teplotním gradientu.

DC zdroj umožňuje nastavit výstupní hodnoty. Teplo je produkováno 4 rezistory umístěnými na spodní straně topného tělesa. V Tab. 4 jsou výpočtem stanovené teoretické hodnoty pro obvod rezistorů. Skutečné hodnoty proudu se ovšem budou lišit a je nutné brát při dalším zpracování v úvahu tyto reálné hodnoty. Tato skutečnost je důvodem, že se pro měření požadovaných parametrů používají voltmetr a ampérmetr.

Tab. 4 Hodnoty teoretického výkonu pro nastavení a reálného výkonu pro rezistorový obvod [1]

$Q_{\text{teor. [W]}}$	$U \text{ [V]}$	$I_{\text{teor. [A]}}$	$I_{\text{real. [A]}}$	$Q_{\text{real. [W]}}$
<b>1</b>	2,83	0,35	0,335	0,95
<b>2</b>	4,00	0,50	0,475	1,90
<b>4</b>	5,66	0,71	0,67	3,79
<b>7</b>	7,48	0,94	0,89	6,66
<b>10</b>	8,94	1,12	1,07	9,57

## 7.1 DC relé CRYDOM D4D07

Tab. 5 Specifikace DC relé CRYDOM D4D07 [57]

Výstup:	Zatěžovací proud	7 A
	Provozní napětí	min. 0 V, max. 400 V
	Řídící napětí	min. 3,5 V, max. 32 V
	Přepínací režim	DC přepínač
Vstup:	Rozsah řídicího napětí	3,5 V ÷ 32 V
	Max. zpětné napětí	32 V
	Min. spínací napětí	3,5 V
	Potřebné vypínací napětí	1 V
	Min. vstupní proud	10 mA
	Max. vstupní proud	15 mA
Obecně:	Provozní teplota	-40 °C ÷ 100 °C
	Hmotnost	75,5 g



Obr. 31 DC relé CRYDOM D4D07

## 7.2 Regulátor teploty Ht40P – TE – K0R - 000

Regulátor reguluje teplotu na teplé styčné ploše v blízkosti vzorku. Regulace může být manuální nebo automatická dle programu předepsaného uživatelem.

Regulátor teploty měří teplotu v požadovaném místě a podle požadované teploty spíná / rozepíná periodicky DC relé, které napájí proudem rezistory.

Tab. 6 Specifikace regulátoru teploty Ht40P – TE – K0R - 000 [58]

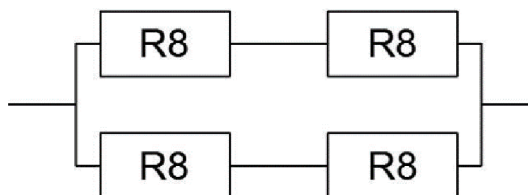
Vstup (T)	teplotní vstup
Výstup (E)	výstup opakovaného přenosu
Výstup 1 (K)	DC spínač
Výstup 2 (O)	neobsazeno
Alarmový výstup (R)	elektromagnetické relé
Verze softwaru	000



Obr. 32 Regulátoru teploty Ht40P

### 7.3 Rezistor R 8R TO220 35W 1% HITANO

Tento typ rezistorů byl vybrán pro svou dobrou elektrickou izolaci a snadnou montáž na topné těleso. V elektrickém obvodu se nachází 4 rezistory zapojeny sérioparalelně.



Obr. 33 Sérioparalelní zapojení 4 rezistorů

Tab. 7 Specifikace rezistoru R 8R TO220 35W 1% HITANO [59]

Odpor	8 $\Omega$
Příkon	35 W
Provozní napětí	max. 350 V
Dielektrická pevnost	1800 V (AC)
Izolační odpor	min. 10 G $\Omega$
Provozní teplota	-65 $^{\circ}\text{C}$ $\div$ 150 $^{\circ}\text{C}$



Obr. 34 Rezistor R 8R TO220 35W 1% HITANO [59]

### 7.4 DC napájecí zdroj Mc Voice

Tab. 8 Specifikace DC napájecího zdroje Mc Voice [1]

Regulovatelný výstupní výkon	0 W $\div$ 72 W
Vstup	220 / 240 V (AC), 50 Hz
Výstup	24 V (DC), 3 A

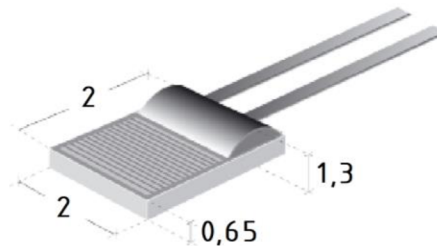
### 7.5 Teplotní sondy Pt 100: P0K1 – 202 – 3FW

Jakožto teplotních sond se užívá platinových termočlánků Pt 100. V závislosti na teplotě se mění elektrická vodivost (odpor), tato charakteristika je dána typem termočlánku a na základě tohoto principu se měří teplota v daném místě.

Tento typ byl zvolen pro svou vysokou přesnost, rychlý čas odezvy, malým rozměrům, vynikající dlouhodobé stabilitě a nízkému samoohřevu.

Tab. 9 Specifikace teplotní sondy Pt 100: P0K1 – 202 – 3FW [60]

Rozsah snímaných teplot	-200 °C ÷ 300 °C
Nominální odpor	100 Ω při 0 °C
Dlouhodobá stabilita	méně než 0,04 % chyb za 1000 hod provozu při max. teplotě
Vlastní samoohřev	3,2 mW / K
Doporučený proud	1 mA (100 Ω)



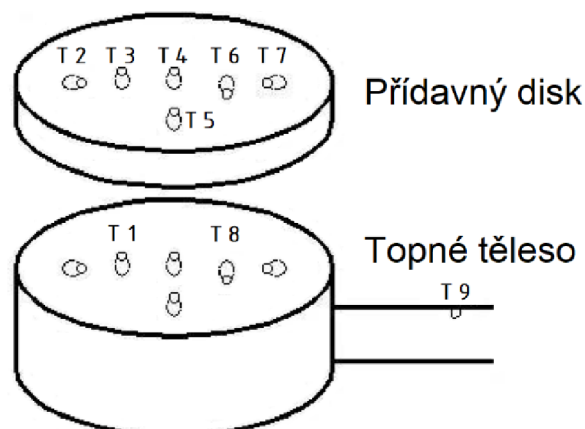
Obr. 35 Teplotní sonda Pt 100 [60]

Díky zkušenostem získaným během testování TS ve vakuové komoře, je zde zamýšleno použití 9 termočlánků, kvůli porovnání naměřených hodnot teploty v různých místech měděného disku umístěného pod vzorkem a topného tělesa.

Je použité třívodičové vedení termočlánků, kvůli eliminaci parazitního odporu, který by mohl vznikat z důvodu zahřívání vodičů.

Jeden termočlánek na přídatném disku je zvolen jako referenční a je připojen k systému automatické regulace teploty.

Termočlánky jsou ve svých polohách zalepeny, k tomu je vhodné např. 2 složkové lepidlo X60.



Obr. 36 Rozmístění teplotních sond Pt100

## 8 Systém sběru dat ESAM Traveller 1 CF

Zařízení ESAM Traveller se používá pro čtení a záznam všech naměřených datových signálů. Přes USB kabel je spojeno s osobním počítačem, ve kterém jsou měřené hodnoty zobrazovány a následně dále vyhodnocovány.

Jedná se o systém sběru dat s nízkým příkonem, nízkým napětím, plně digitální s možností zvolení daného kanálu (celkově až 32 kanálů). Umožňuje plynulý přenos dat v reálném čase, rychlostí až 8 MB / s přes USB 2.0 port. [61]

Tab. 10 Specifikace systému sběru dat ESAM Traveller 1 CF verze 2.5 [61]

Obecně	32 kanálový systém s LCD displejem a tlačítky
Sběr dat	simultánní sběr dat pro všechny kanály
A/ D převodník	16bitový A/D převodník pro každý analogový kanál
Filtr	digitální hardwarový filtr každého kanálu (redukce šumu)
Rozhraní	USB 2.0 rozhraní pro přenos dat a nastavení příkazů do nebo z PC
Přídavné rozhraní	RS232 pro případné připojení dálkového ovládání
Napájení	10 V ÷ 36 V (DC)
Rozměry	121 mm x 302 mm x 206 mm
Hmotnost	3,5 kg

Tab. 11 Specifikace vstupního odporového adaptéru pro měření teploty  
Vstup od teplotních sond Pt100

Rozsah měření	-100 °C ÷ 500 °C
Rozlišení	min. 0,02 °C
Vstupní impedance	5 MΩ
Celková přesnost	±1 °C
Napájecí napětí	5 V ÷ 10 V
Napájecí proud	max. 2 mA



Obr. 37 Systém sběru dat ESAM Traveller 1 CF [61]

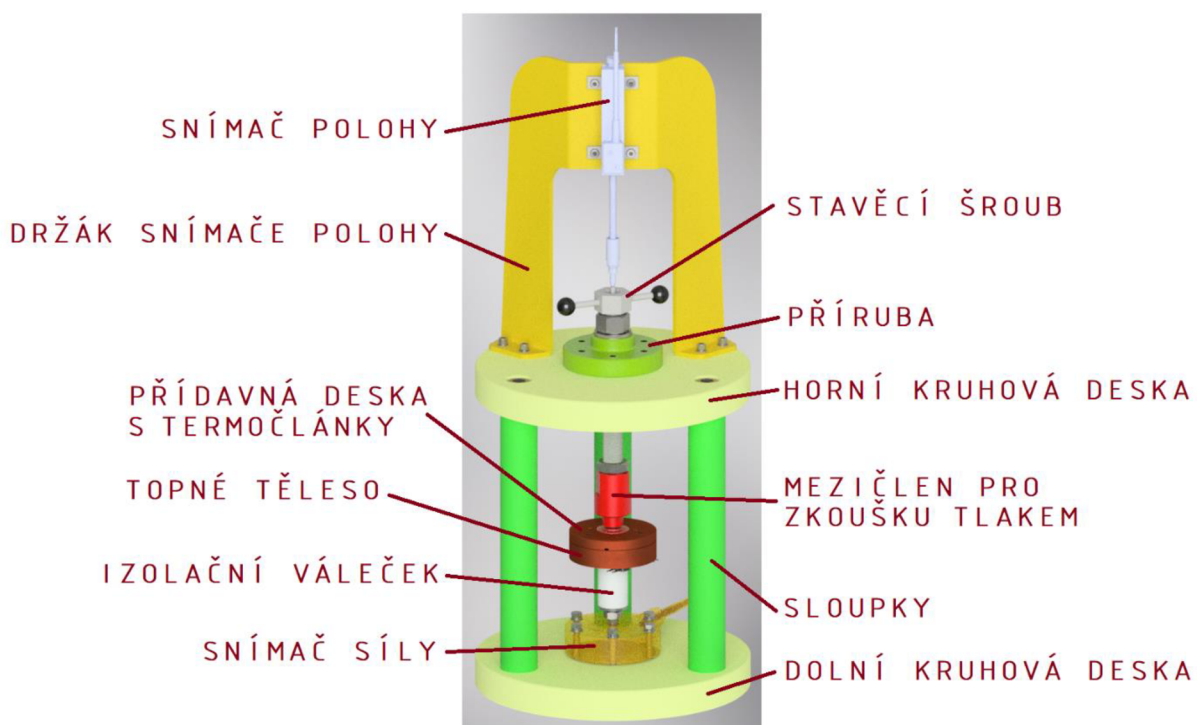
## 9 Konstrukční návrh experimentálního testovacího zařízení

Konstrukce ETZ je navržena účelně a podléhá požadavkům na ni kladeným. Je zde publikován pouze konečný návrh z důvodu složitého a zdlouhavého textového zpracování všech slepých uliček návrhu ETZ.

Tato konstrukce umožňuje měření přítláčné síly s nastavením maximálního zdvihu aktuátoru tepelného spínače a následné měření polohy. Díky snadné výměně některých komponentů umožňuje také vyvození tahové síly a měření posuvu testovaného vzorku.

Následný popis návrhu konstrukce je vztažen pro zkoušku tlakem s nastavením polohy max. zdvihu aktuátoru TS. Avšak konstrukce a konfigurace pro zkoušku tahem se liší pouze v nutnosti výměny mezičlenu pro zkoušku tlakem za mezičlen pro zkoušku tahem, který se montuje mezi aktuátor TS a stavěcí šroub ETZ a vysunutí kratší jehly stavěcího šroubu (viz. podkapitola 9.5 Mezičlen pro zkoušku tahem).

Pojednání o pevnostní analýze je uvedeno u jednotlivých součástí, která jsou v rámci konstrukce kritická. Návrh konstrukce je koncipován na působící tlakovou sílu od vzorku 2000 N a návrhový součinitel k MSP u většiny komponentů  $k_n = 4$ , takto vysoké hodnoty kvůli požadované tuhosti ETZ. Při působení tahové síly je max. možná hodnota vyvozená stavěcím šroubem pouze 300 N (viz. podkapitola 9.5 Mezičlen pro zkoušku tahem).



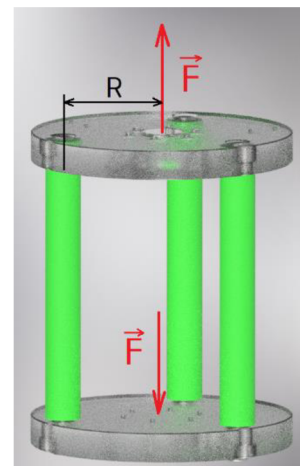
Obr. 38 Popis členů ETZ (tlaková zkouška)

### 9.1 Rám

Rám je tvořen horní kruhovou deskou, dolní kruhovou deskou a třemi sloupky. Díky sloupkům, které mají kruhový průřez průměru 30 mm, jsou od sebe kruhové desky vzdáleny 215 mm. Pro spojení těchto částí v jeden tuhý celek je použito 6 šroubů s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem ISO 4762 - M12x45 – 10.9, vůči povolení zajištěny podložkami ČSN 02 1740.01 - 12.

## Pevnostní analýza rámu

Výpočet pevnosti sloupků byl proveden za využití symetrie rámu, tudíž na každý sloupek působí třetinová zatěžující síla. Předpokládá se vysoká tuhost horní a dolní kruhové desky, a proto zanedbání vlivu ohybu na pevnost sloupků.



Obr. 39 Silové zatížení rámu

Zatěžující síla  
Normálová síla ve sloupku  
Průřez sloupku  
Součinitel tvaru (závit – tah)

$F = 2000 \text{ N}$   
 $N = F/3 = 666,67 \text{ N}$   
 $S_{\text{Sloupek}} = 593,761 \text{ mm}^2$   
 $\alpha_{N \text{ Sl.}} = 4,4$

$$\sigma_N = \frac{N}{S_{\text{Sloupek}}} = -\frac{\frac{2000}{3} \text{ N}}{593,761 \text{ mm}^2} = 1,123 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{N \text{ max}} = \sigma_N \cdot \alpha_{N \text{ Sl.}} = 1,123 \text{ MPa} \cdot 4,4 = 4,940 \text{ MPa}$$

$$R_{e \text{ Sl. min}} = \sigma_{N \text{ max}} \cdot k_n = 4,940 \text{ MPa} \cdot 4 = 19,761 \text{ MPa}$$

Kde:  $\sigma_N$  [MPa] normálové napětí od normálové síly  
 $\sigma_{N \text{ max}}$  [MPa] max. normálové napětí od normálové síly  
 $R_{e \text{ Sl. min}}$  [MPa] min. potřebná mez kluzu materiálu sloupků

Horní a dolní kruhová deska nelze přesně analyticky pomocí prosté pružnosti a pevnosti interpretovat, avšak díky pevnostní analýze v programu Autodesk Inventor Professional lze předpokládat součinitel bezpečnosti k MSP mnohonásobně vyšší, než je návrhový  $k_n$ , prohnutí max. v řádech setin mm.

### Volba materiálu rámu:

*Slitina hliníku EN AW-2024, AICU4Mg1, ČSN 42 4203, ve stavu T351. Tento materiál se vyznačuje výbornou obrobiteľnosťou a ke své nízké hustotě vysokou pevností. Udávaná mez pevnosti v tahu  $R_m = 420 \text{ MPa}$ , mez kluzu  $R_e = 270 \text{ MPa}$  a tažnosť přibližně 8 %. Používá se pouze ve vytvrzeném stavu. Po vytvrzení tvrdost kolem 110 HB. Nelze svařovat, s obtížemi lze eloxovat.*

### **9.1.1 Horní kruhová deska**

Horní kruhová deska o průměru 220 mm a tloušťce 25 mm tvoří ideální horizontální rovinu pro uchycení příruby a držáku snímače polohy. Pro spojení s přírubou slouží šest děr průměru 6,4 mm, pro uchycení držáku snímače polohy čtyři průchozí závit M4.

### 9.1.2 Dolní kruhová deska

Dolní kruhová deska o průměru 220 mm a tloušťce 25 mm tvoří podstavu ETZ. Ve středové oblasti se nachází šest průchozích závitů M5, složí pro uchycení a vystředění snímače síly. Ke spojení slouží šrouby se šestihrannou hlavou ISO 4014 – M5x40 – 8.8, s podložkami ISO 7089 – 5 – 140 HV a ČSN 02 1740.01 – 5.

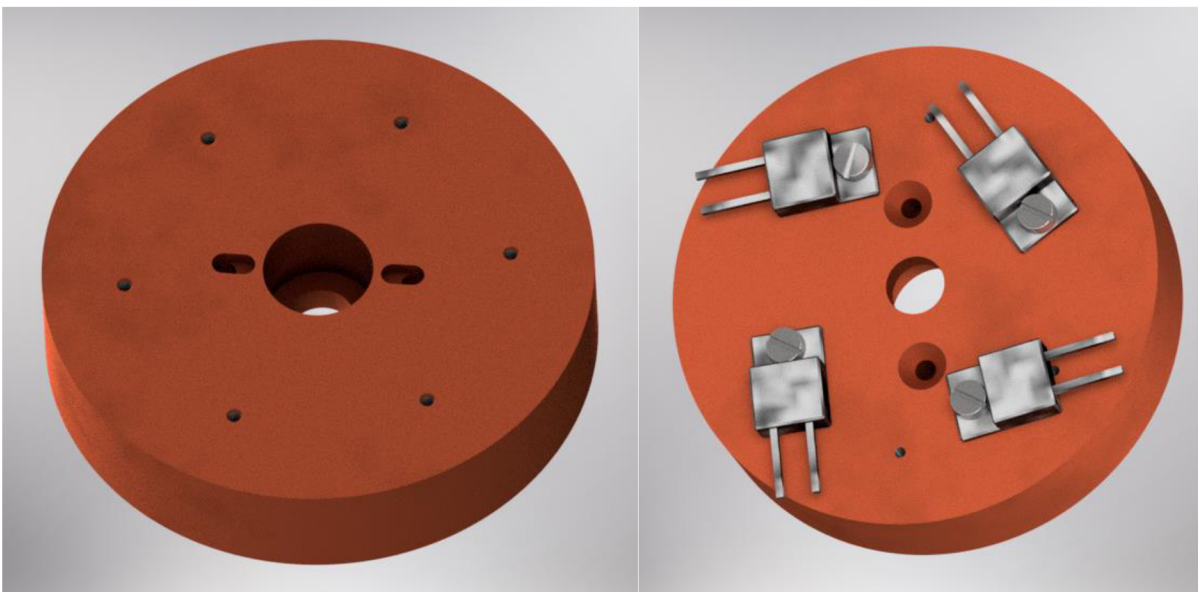
### 9.2 Topné těleso

Topné těleso je vyrobeno z mědi EN CW004A. Použití této čisté ušlechtilé mědi zaručuje výborné rozvádění a akumulaci tepla od rezistorů směrem ke vzorku. Tento materiál má při teplotě 25 °C součinitel tepelné vodivosti  $386 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  [4].

Každý ze čtyř rezistorů je přichycen k topnému tělesu pomocí šroubu s nízkou válcovou hlavou s drážkou ISO 1207 – M3x6 – 4.8, zajištěny podložkami ČSN 02 1740.01 – 3.

Na tělese se nachází 2 z celkových 9 termočlánků ETZ. Jsou umístěny a zalepeny do předpřipravených drážek, jejich vodiče jsou svedeny průchozími otvory dolů.

Základní rozměry topného tělesa jsou: průměr 70 mm, tloušťka 15 mm.



Obr. 40 Horní strana topného tělesa a dolní strana topného tělesa s rezistory

Pro uchycení testovaného vzorku je připraveno 6 průchozích závitů M2x0,4 s roztečí 49 mm, pro spojení pak poslouží závitové tyče o potřebné délce, popř. šroubky. Celek vzorku může zahrnovat i přídavný měděný disk (průměr 70 mm, tloušťka 8 mm) s 6 implementovanými termočlánky. Pro uchycení k topnému tělesu mohou posloužit tři šrouby se zápusnou hlavou s drážkou ISO 2009 M2x16 – 4.8.

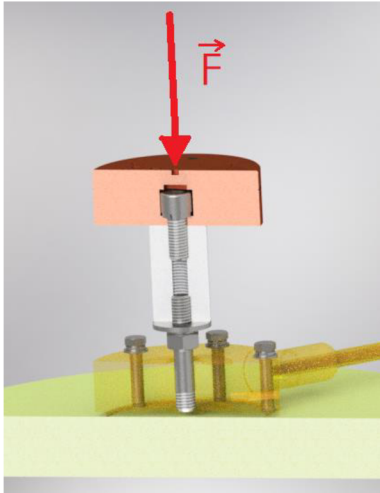
Aby nedocházelo k přenosu tepla vedením z topného tělesa na snímač síly, a tím i celou konstrukci ETZ, je spojení provedeno pomocí válečku o vnějším průměru 24 mm, vnitřní průchozí dírou se závitem M8 a délce 40 mm. Tento izolační váleček je vyroben z materiálu PA6G (Polyamid), byl vybrán pro svůj nízký součinitel tepelné vodivosti ( $\lambda = 0,33 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a dostačující mez kluzu v tahu ( $R_e = 68 \text{ MPa}$ , viz. pevnostní analýza izolačního válečku). [64]



**Změna výšky topného tělesa a přidavného disku vlivem teploty**

Teplotní roztažnost	$\alpha_{T\text{Cu}} = 16,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Výška	$H = 15 \text{ mm} + 8 \text{ mm} = 23 \text{ mm}$
Předpokládaný ohřev	$\Delta T = 55 \text{ K}$ (z 15 °C na 70 °C)

Změna výšky [2]:  $\Delta L_T = \alpha_{T\text{Cu}} \cdot \Delta T \cdot H = 16,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 55 \text{ K} \cdot 23 \text{ mm} = 0,0207 \text{ mm}$

**Pevnostní analýza izolačního válečku**

Normálová síla	$N_{IV} = -F = -2000 \text{ N}$
Průřez válečku	$S_{IV} = 402,12 \text{ mm}^2$
Celková délka válečku	$L_{IV} = 40 \text{ mm}$
Délka, do níž nezasahují šrouby	$L_{TIV} = 14,8 \text{ mm}$
Předpokládaný ohřev	$\Delta T = 45 \text{ K}$
Součinitel tvaru (závit – tlak)	$\alpha_{NIV} = 2,8$

$$\sigma_N = \frac{N_{IV}}{S_{IV}} = -\frac{2000 \text{ N}}{402,12 \text{ mm}^2} = -4,974 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{N\text{max}} = \sigma_N \cdot \alpha_{NIV} = -4,974 \text{ MPa} \cdot 2,8 = -13,927 \text{ MPa}$$

$$R_{eIV\text{min}} = |\sigma_{N\text{max}}| \cdot k_n = 13,927 \text{ MPa} \cdot 4 = 55,71 \text{ MPa}$$

Obr. 41 Sílové působení

Kde:  $R_{eIV\text{min}}$  [MPa] min. potřebná mez kluzu materiálu izolačního válečku

Volba materiálu izolačního válečku: Polyamid PA6G

mez kluzu

$$R_{e\text{PA6G}} = 68 \text{ MPa}$$

Youngův modul pružnosti v tahu

$$E_{\text{PA6G}} = 3,56 \text{ GPa}$$

teplotní roztažnost

$$\alpha_{T\text{PA6G}} = 12 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

Pro tento model zatížení je vybráný materiál dostačující, avšak mohla by nastat situace, kdy síla působí excentricky z důvodu nepřesné montáže.

Vnější průměr válečku	$D = 24 \text{ mm}$
Vnitřní závit M8	$d_{M8} = 8 \text{ mm}$
Excentricita působící síly	$e = 5 \text{ mm}$
Ohybový moment	$M_{oIV} = F \cdot e = 2000 \text{ N} \cdot 5 \text{ mm} = 10 \text{ Nm}$
Součinitel tvaru (závit – ohyb)	$\alpha_{MoIV} = 2,9$

$$J_y = J_x = \frac{\pi}{64} (D^4 - d_{M8}^4) = \frac{\pi}{64} [(24 \text{ mm})^4 - (8 \text{ mm})^4] = 16\,084,954 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{Mo} = \frac{M_{oIV}}{J_y} \cdot \frac{d_{M8}}{2} = \frac{10 \text{ Nm}}{16\,084,954 \text{ mm}^4} \cdot \frac{24 \text{ mm}}{2} = 7,460 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mo\text{max}} = \sigma_{Mo} \cdot \alpha_{MoIV} = 7,460 \text{ MPa} \cdot 2,9 = 21,635 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = |\sigma_{Nmax}| + \sigma_{Mo max} = 13,927 \text{ MPa} + 21,635 \text{ MPa} = 35,562 \text{ MPa}$$

$$k_{kMSP} = \frac{R_{ePA6G}}{\sigma_{max}} = \frac{68 \text{ MPa}}{35,562 \text{ MPa}} = 1,91$$

Kde: $J_y, J_x$ [mm <sup>4</sup> ]	osové kvadratické momenty
$\sigma_{Mo}$ [MPa]	normálové napětí od ohybu
$\sigma_{Mo max}$ [MPa]	max. normálové napětí od ohybu
$\sigma_{max}$ [MPa]	celkové max. normálové napětí
$k_{kMSP}$ [-]	součinitel bezpečnosti k MSP

Součinitel bezpečnosti je pro materiál PA6G za excentrického působení síly na rameni dlouhém 5 mm nižší nežli návrhový, avšak je stále dostačující.

### Výpočet prodloužení izolačního válečku vlivem síly a teploty:

$$\Delta L_{FIV} = \frac{N_{IV} \cdot L_{IV}}{E_{PA6G} \cdot S_{IV}} = \frac{-2000 \text{ N} \cdot 40 \text{ mm}}{3,56 \text{ GPa} \cdot 402,12 \text{ mm}^2} = -0,0559 \text{ mm (stlačení)}$$

$$\Delta L_{TIV} = \alpha_{TPA6G} \cdot \Delta T \cdot L_{TIV} = 12 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \cdot 45 \text{ K} \cdot 14,8 \text{ mm} = 0,0799 \text{ mm}$$

(prodloužení)

$$\Delta L_{IV} = \Delta L_{FIV} + \Delta L_{TIV} = -0,0559 \text{ mm} + 0,0799 \text{ mm} = 0,024 \text{ mm (prodloužení)}$$

Kde: $\Delta L_{FIV}$ [mm]	změna délky vlivem působící síly
$\Delta L_{TIV}$ [mm]	změna délky vlivem teploty
$\Delta L_{IV}$ [mm]	celková změna délky

Prodloužení válečku vlivem teploty se zdá být poměrně velké, avšak díky velmi nízké tepelné vodivosti, toto prodloužení nastane až po dlouhodobém působení teploty 70 °C.

Spojení izolačního válečku s topným tělesem je prostřednictvím šroubu s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem ISO 4762 – M8x20 – 10.9, zajištěn podložkou ČSN 02 1740.01 – 8.

Propojení izolačního válečku a snímače síly je řešeno závrtným šroubem ČSN 02 1174 – M8x40 – 10.9, to zaručí při tlakové zkoušce dodržení návrhového součinitele bezpečnosti k MSP ( $k_k = 4,57$ ), aby nedošlo k otláčení polyamidového válečku je použita podložka plochá velká DIN 9021 – 8 -100 HV, dotaženo šestihrannou maticí ISO 4032 – M8 – 8 s podložkou ČSN 02 1740.01 – 8.

### Kontrola na otláčení závitů M8x1,25 izolačního válečku

Následující kontrola na otláčení se vztahuje ke zkoušce tahem, kdy je silové působení přenášeno pouze pomocí závitu. Kvůli dimenzování spoje pro uchycení vzorku při tahové zkoušce pouze na 300 N, je i tato kontrola provedena s touto hodnotou.

Navrhovaná max. tahová zatěžující síla

$$F_A = 300 \text{ N}$$

Velký průměr závitu šroubu	$d = 8 \text{ mm}$
Střední průměr závitu šroubu	$d_2 = 7,188 \text{ mm}$
Malý průměr závitu šroubu	$d_1 = 6,647 \text{ mm}$
Počet činných závitů	$z = 12$

$$\text{Nosná výška závitu} \quad H_1 = \frac{d-d_1}{2} = \frac{8 \text{ mm} - 7,188 \text{ mm}}{2} = 0,406 \text{ mm}$$

$$\text{Stlačovaná plocha jednoho rozvinutého závitu} \\ S_{p1} = \pi \cdot d_2 \cdot H_1 = \pi \cdot 7,188 \text{ mm} \cdot 0,406 \text{ mm} = 9,168 \text{ mm}^2$$

$$\text{Stlačovaná plocha všech rozvinutých závitů} \\ S_p = S_{p1} \cdot z = 9,168 \text{ mm}^2 \cdot 12 = 110,02 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tlak ve styčné ploše závitu} \quad p = \frac{F_A}{S_p} = \frac{300 \text{ N}}{110,02 \text{ mm}^2} = 2,727 \text{ MPa}$$

Bohužel z důvodu neúspěšného dohledání potřebných informací, ve kterých se nachází vypovídající hodnota max. dovoleného tlaku v závitech zhotovených v materiálu PA6G, nelze s jistotou konstatovat, zda tlak ve styčné ploše závitů při tahové síle 300 N je ještě bezpečný.

### 9.3 Stavěcí šroub

Stavěcí šroub tvoří stěžejní součást ETZ. Pro jemné nastavení vzdálenosti vůči vzorku je opatřen závitem M16x1 o délce 140 mm, stejným závitem je opatřena příruba, ve které se může vertikálně pohybovat.

Šroub je dutý z toho důvodu, že v jeho jádru se volně vertikálně pohybují jehly. Tento otvor o průměru 4,5 mm má délku přibližně 144 mm, v oblasti hlavy šroubu je otvor rozšířen na průměr 12 mm. Celková délka stavitelného šroubu činí 158 mm.

V hlavě tohoto šroubu je zhotovená příčná díra se závitem M6, do které je z obou stran zašroubován ocelový drát se závity na koncích, pro zašroubování do hlavy stavitelného šroubu a bakelitových koulí s vnitřním závitem M6 (KKC-L 16/ M6), tímto způsobem vznikne klička pro snazší uchopení stavitelného šroubu uživatelem a jeho následné dotažení/povolení pomocí šestihranné matice ISO 4032 (DIN 934) M16x1 – 8. V případě, že je šroub příliš utážen a rukou ho nejde povolit, lze demontovat rukojetě a použít maticový klíč 26 mm. Před začátkem tlakové zkoušky je nutné vyvodit předpětí alespoň 3000 N spoje pohybový šroub – příruba.

Předpětí	$F_i = 3000 \text{ N}$
Součinitel utahovacího momentu (pro nenamazaný závit [2])	$K = 0,2$
Průměr závitu stavěcího šroubu	$d = 16 \text{ mm}$

#### Min. utahovací moment matice dotažené k přírubě [2]:

$$M_{utah} = K \cdot F_i \cdot d = 0,2 \cdot 3000 \text{ N} \cdot 16 \text{ mm} = 9,6 \text{ Nm}$$

Při předpokladu max. axiální tlakové síly působící od vzorku 1500 N a nutnosti povolení matice stavitelného šroubu při této situaci (po provedeném testu), a tím odlehčení celého ETZ a vzorku, je předpětí ve spoji cca 1500 N, tudíž potřebný moment k povolení:

**Předpokládaný povolovací moment matice příruby:**

$$M_{povol} = K \cdot F_i \cdot d = 0,2 \cdot 1500 \text{ N} \cdot 16 \text{ mm} = 4,8 \text{ Nm}$$

Délka jedné kličky  $x = 40 \text{ mm}$

**Potřebná síla vyvozená rukou uživatele pomocí kličky stavěcího šroubu:**

$$F_{klička} = \frac{M_{povol}}{x} = \frac{4,8 \text{ Nm}}{40 \text{ mm}} = 120 \text{ N}$$

Což ho hodnota, které lze dosáhnout, nutno ovšem ověřit v praxi, popř. bude nutné použít i druhý maticový klíč na hlavu šroubu.



Obr. 42 Pohled na horní část stavěcího šroubu

**Pevnostní analýza stavěcího šroubu**

Výpočet je konzervativní. Předpokládá, že může nastat situace, kdy působící síla nemá působiště přesně v ose šroubu, čímž vznikne ohybový moment. Návrhový součinitel bezpečnosti k MSP  $k_n = 4$ .

Obr. 43 Excentrické působení zatěžující síly

Malý průměr závitu M16x1

Průměr středového otvoru

Zatížená délka (max.)

Průřez šroubu M16x1

Excentricita působící síly

Normálová síla

Ohybový moment

Součinitel tvaru (tlak)

Součinitel tvaru (ohyb)

$$d_1 = 14,917 \text{ mm}$$

$$d_{otvor} = 4,5 \text{ mm}$$

$$L_{sš} = 108,6 \text{ mm}$$

$$S_{sš} = 158,86 \text{ mm}^2$$

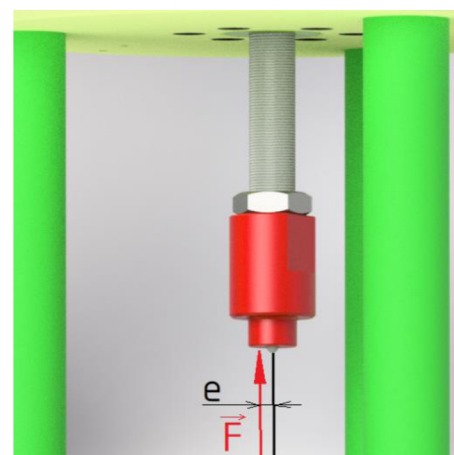
$$e = 5 \text{ mm}$$

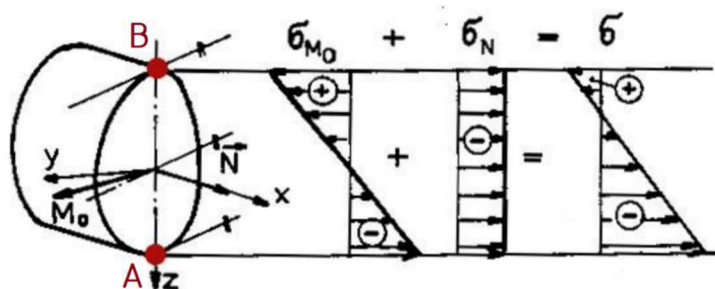
$$N_{sš} = F = 2000 \text{ N}$$

$$M_{o_{sš}} = F \cdot e = 2000 \text{ N} \cdot 5 \text{ mm} = 10 \text{ Nm}$$

$$\alpha_{N_{sš}} = 3,5$$

$$\alpha_{M_{o_{sš}}} = 3,6$$





Obr. 44 VVÚ, nejnebezpečnější místo A na povrchu šroubu (podél závitu)

$$\sigma_N = \frac{N_{S\check{S}}}{S_{S\check{S}}} = -\frac{2000 \text{ N}}{158,86 \text{ mm}^2} = -12,590 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{N \max} = \sigma_N \cdot \alpha_{N \text{ S}\check{S}} = -12,590 \text{ MPa} \cdot 3,5 = -44,064 \text{ MPa}$$

$$J_y = J_x = \frac{\pi}{64} (d_1^4 - d_{\text{otvor}}^4) = \frac{\pi}{64} [(14,917 \text{ mm})^4 - (4,5 \text{ mm})^4] = 2410,9724 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{M_o} = \frac{M_{o \text{ S}\check{S}}}{J_y} \cdot \frac{d_{M16}}{2} = \frac{10 \text{ Nm}}{2410,3724 \text{ mm}^4} \cdot \frac{16 \text{ mm}}{2} = 33,190 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{M_o \max} = \sigma_{M_o} \cdot \alpha_{M_o \text{ S}\check{S}} = 33,190 \text{ MPa} \cdot 3,6 = 119,484 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = |\sigma_{N \max}| + \sigma_{M_o \max} = 44,064 \text{ MPa} + 119,484 \text{ MPa} = 163,548 \text{ MPa}$$

$$R_{e \text{ S}\check{S} \min} = \sigma_{\text{S}\check{S} \max} \cdot k_n = 163,548 \text{ MPa} \cdot 4 = 654,190 \text{ MPa}$$

Kde:  $R_{e \text{ S}\check{S} \min}$  [MPa] min. potřebná mez kluzu materiálu šroubu

Volba materiálu stavěcího šroubu: ocel ČSN 16 224.6

mez kluzu

$$R_{e \text{ 16 224.6}} = 685 \text{ MPa}$$

Youngův modul pružnosti v tahu  $E_{16 \text{ 224.6}} = 207 \text{ GPa}$

Navržený polotovár stavěcího šroubu je tyč šestihránná dle ČSN 42 6530, pro snazší výrobu. Avšak je nutné ověřit, zda je tato ocel dostupná u prodejce, popř. použít jinou s podobnou hodnotou mezí kluzu.

### Kontrola stavěcího šroubu k MS vzpěrné stability

vetknutý prut s volným koncem:  $\alpha_{\text{vzpěr}} = \frac{\pi}{2}$

$$F_{\text{krit}} = \frac{\alpha_{\text{vzpěr}}^2 \cdot E_{\text{ocel}} \cdot J_y}{L_{\text{S}\check{S}}^2} = \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot 207 \text{ GPa} \cdot 2410,3724 \text{ mm}^4}{(108,6 \text{ mm})^2} = 104\,384,16 \text{ N}$$

Kde:  $\alpha_{\text{vzpěr}}$  [-]  
 $F_{\text{krit}}$  [N]

součinitel vzpěrné stability

Eulerova kritická síla, při které nastane MSVS

Při zkoušce tlakem je se stavěcím šroubem spojen mezičlen pro zkoušku tlakem. Je zašroubován přibližně do hloubky 9,5 mm a dotažen k šestihranné matici nízké ISO 4035 – M16x1 – 8 pomocí dvou maticových klíčů 24 mm. Materiál mezičlenu EN AW-2024 se při výpočtech ukázal jako vhodný.

### 9.3.1 Jehly stavěcího šroubu

Při zkoušce tlakem jsou ve funkci 2 jehly, základní jehla délky 164 mm a přídavná jehla délky 36 mm. Delší jehla je v kontaktu s pomocným členem vzorku. Při zkoušce tahem se kratší jehla vyjme.

Jehly jsou vyrobeny z hliníkového drátu tvrdého (norma STN 42 4004.31), z důvodu nízké hmotnosti. Polotovarem je drát o průměru 4 mm. Vyleštěný jemným smirkovým papírem po celé jejich délce. Pro dokonalý pohyb v dutém stavitelném šroubu a mezičlenu jsou namazány silikonovým olejem. Dolní dosedací plochy jehel jsou zaobleny, popř. do špičky.

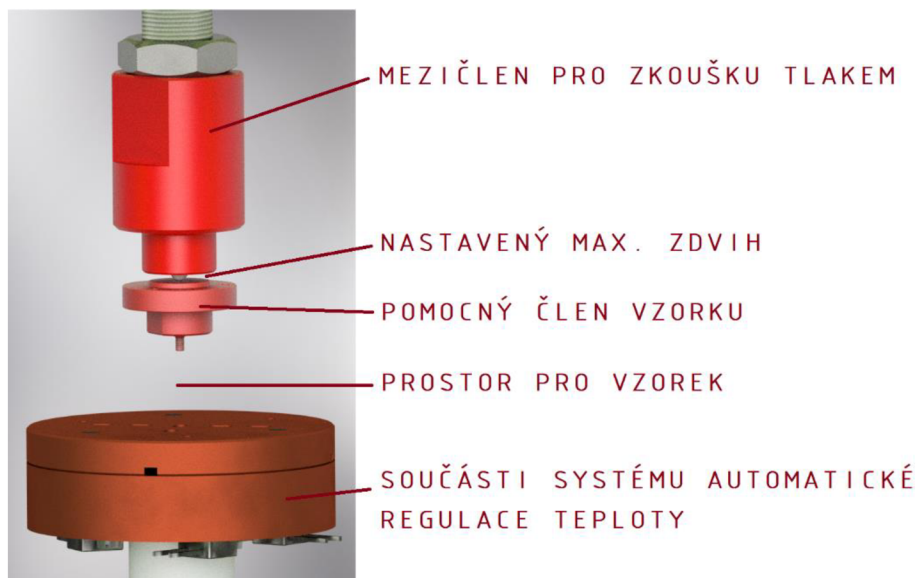
Dolní jehla může dosedat přímo na plochu vzorku, avšak dokonalejší měření je dosaženo za použití pomocného členu vzorku.

Vrchní konec horní jehly slouží pro kontakt se snímačem polohy. Po prvotním smontování ETZ i se snímačem síly a polohy je nutné dokonale seřídít souosost jehel s osou snímače polohy.

### 9.3.2 Pomocný člen vzorku

Tato součást, jež je vyrobena z oceli 15 230.6 (volba materiálu viz. podkapitola 9.5 Mezičlen pro zkoušku tahem), tvoří jakési příslušenství ETZ. Při nedokonalé vrchní dosedací ploše vzorku se pomocný člen vzorku k němu přimontuje pomocí vnějšího závitu M2x0,4 – 6g o délce 3 mm (+ kužel 1mm), čímž se vytvoří lepší dosedací plocha pro jehlu stavěcího šroubu. Dotažení této součásti k čelu vzorku se provede maticovým klíčem 13 mm.

Pomocný člen zároveň patří do skupiny prvků mezičlenu pro zkoušku tahem.



Obr. 45 Pohled na konfiguraci při tlakové zkoušce

## Kontrola stykových ploch čel mezičlenu pro zkoušku tlakem a pomocného členu vzorku na otláčení

Dovolený tlak pro hliníkové slitiny [2]  $p_{dov.} = 50 \text{ MPa}$   
 (míjivý cyklus, součinitel bezpečnosti k meznímu stavu otláčení roven 1,5)  
 Velikost stykové plochy  $S_p = 153,938 \text{ mm}^2$   
 Vnější zatěžující síla  $F = 2000 \text{ N}$

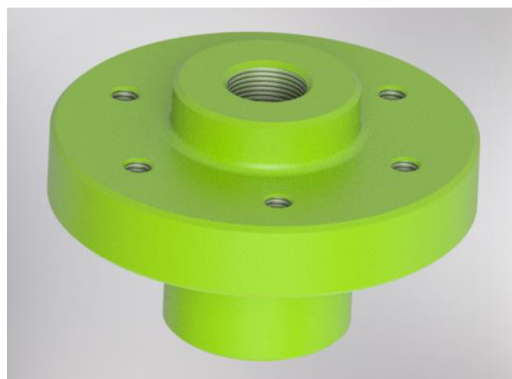
Tlak ve stykových plochách:

$$p = \frac{F}{S_p} = \frac{2000 \text{ N}}{153,938 \text{ mm}^2} = 12,99 \text{ MPa} < p_{dov} \text{ vyhovuje}$$

### 9.3.3 Příruba

Její návrh vznikl převážně z požadavku přesného vedení stavěcího šroubu, to zaručuje přesná výroba tohoto komponentu a délka závitu M16x1, která činní 50 mm. Další funkcí je přenést silové zatížení působící na stavěcí šroub na horní kruhovou desku, s tou je spojena šesti šrouby se zápustnou hlavou s vnitřním šestihranem ISO 10 642 M6x40 – 10.9.

Na horní čelo příruby dosedá podložka ISO 7089 – 16 – 140 HV s šestihrannou maticí ISO 4032 – M16x1 – 8, tyto normalizované součásti slouží pro aretaci stavěcího šroubu v požadované poloze při tlakové zkoušce.



Obr. 46 Příruba

### Kontrola na otláčení závitů M16x1 příruby a stavěcího šroubu

Navrhovaná max. zatěžující síla tohoto spoje	$F_A = 10\,000 \text{ N}$
Velký průměr závitu šroubu	$d = 16 \text{ mm}$
Střední průměr závitu šroubu	$d_2 = 15,350 \text{ mm}$
Malý průměr závitu šroubu	$d_1 = 14,917 \text{ mm}$
Počet činných závitů	$z = 48$

Nosná výška závitu  $H_1 = \frac{d-d_1}{2} = \frac{16 \text{ mm} - 14,917 \text{ mm}}{2} = 0,5415 \text{ mm}$

Stlačovaná plocha jednoho rozvinutého závitu  
 $S_{p1} = \pi \cdot d_2 \cdot H_1 = \pi \cdot 15,35 \text{ mm} \cdot 0,5415 \text{ mm} = 26,113 \text{ mm}^2$

Stlačovaná plocha všech rozvinutých závitů  
 $S_p = S_{p1} \cdot z = 26,113 \text{ mm}^2 \cdot 48 = 1253,424 \text{ mm}^2$

Tlak ve styčné ploše závitů  $p = \frac{F_A}{S_p} = \frac{10000 \text{ N}}{1253,424 \text{ mm}^2} = 7,98 \text{ MPa}$

Volba materiálu příruby:

slitina hliníku EN AW-2024, dovolený tlak v závitech  $p_d = 24 \text{ MPa}$  [2]

Max. zatěžující síla tohoto spoje

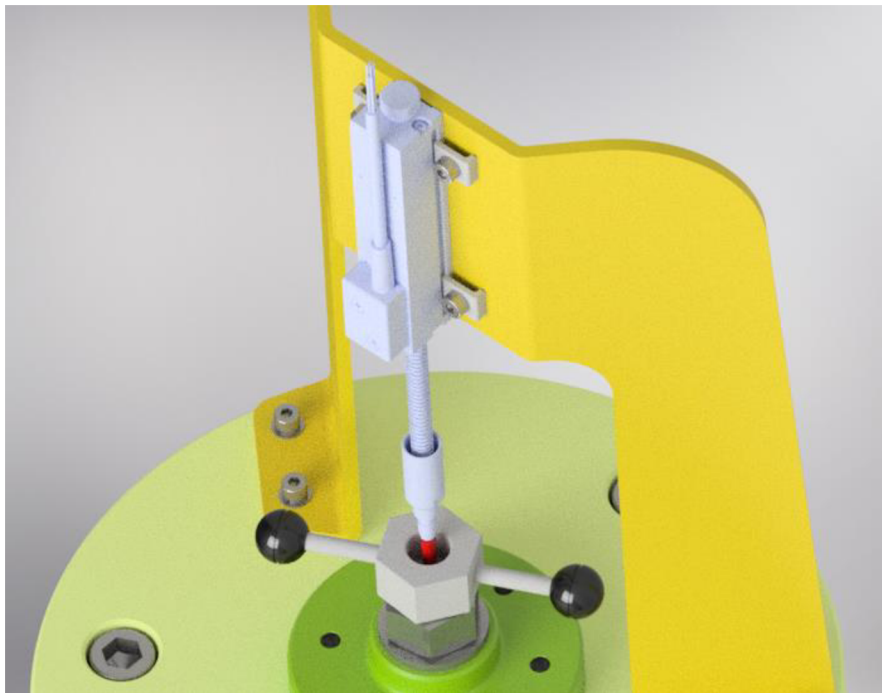
$$F_{A \max} = p_d \cdot S_p = 24 \text{ MPa} \cdot 1253,424 \text{ mm}^2 = 30\,082,18 \text{ N}$$

#### 9.4 Držák snímače polohy

Tato součást má za úkol ustavení snímače polohy do správné vertikální polohy v jedné ose s ostatními komponenty ETZ. Pro montáž slouží čtyři otvory s roztečí dle doporučení výrobce tohoto snímače, ten také k snímači dodává úchyty. Tyto úchyty drží snímač polohy, a to za pomoci šroubů s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem ISO 4762 – M4x12 – 8.8, podložek ČSN 02 1745.02 – 4,3 a šestihranných matic ISO 4032 – M4 – 6.

Čtyřmi šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem ISO 4762 – M4x25 – 8.8 a podložkami ČSN 02 1745.02 – 4,3 je držák uchycen k horní kruhové desce. Pro dokonalé ustavení jsou v držáku pro tyto šrouby díry o průměru 4,8 mm.

Držák snímače polohy je zhotoven z ocelového plechu (materiál: značka EN S235) tloušťky 3 mm, kvůli potřebné tuhosti.



Obr. 47 Držák snímače polohy

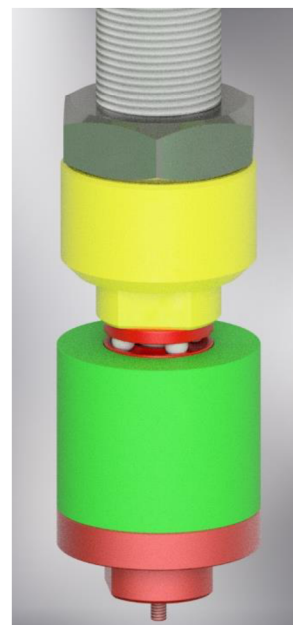


## 9.5 Mezičlen pro zkoušku tahem

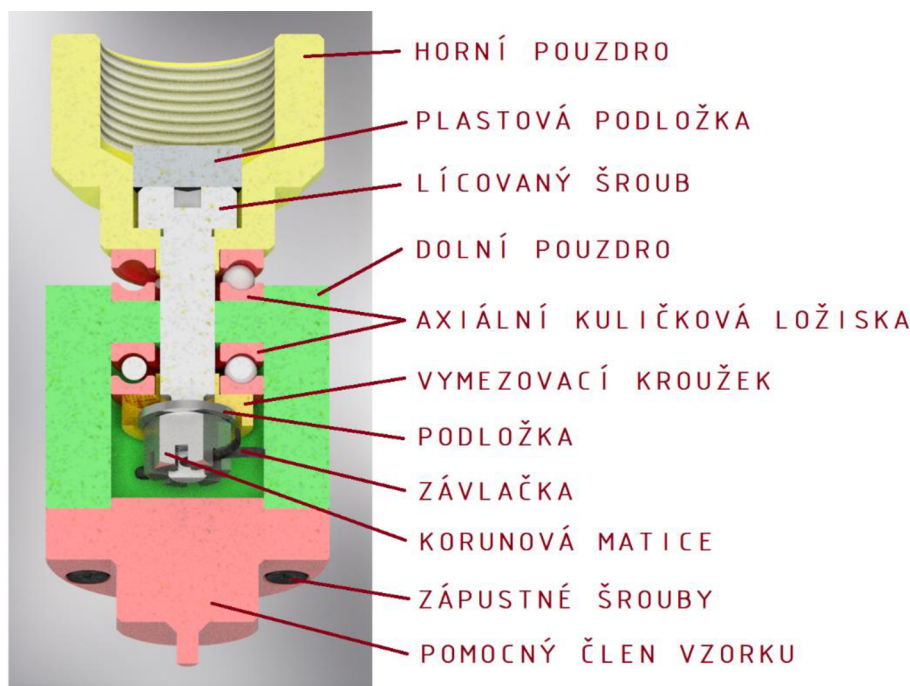
Při testování vzorku tahem je zapotřebí vyměnit mezičlen pro zkoušku tlakem za mezičlen pro zkoušku tahem, uchycení k stavěcímu šroubu je shodné, před tím se však odstraní kratší jehla stavěcího šroubu a mezičlen (dolní pouzdro) se spojí s pomocným členem vzorku, užitím 3 šroubů se zápusťnou hlavou ISO 7046-1 M2x10 – 4.8 – Z.

Kvůli zajištění dokonalejšího styku jehly je nad hlavou lícovaného šroubu vložena plastová podložka. Jehla se při této zkoušce pohybuje společně se stavěcími šroubem. Snímač polohy je takto schopen měřit posun vzorku (aktuátoru TS) a postupným vyšroubováváním stavěcího šroubu směrem nahoru je vyvozována tahová síla.

Tento mezičlen je předem smontován a odzkoušen jeho volný chod, tedy nezávislé otáčení horní části vůči spodní, avšak s absencí vůle.



Obr. 48 Konfigurace při tahové zkoušce vzorku



Obr. 49 Komponenty mezičlenu pro zkoušku tahem

Mezičlen zajišťuje požadovanou funkci díky 2 axiálním kuličkovým ložiskům SKF BA 6, ke kterým je přitaženo horní a dolní pouzdro. Spoj zahrnuje lícovaný šroub s osazením DIN ISO 7379 – M4x16 – 12.9, korunovou matici ČSN 02 1411 – M4 – 8, podložku ISO 7089 – 4 – 140 HV, závlačku ISO 1234 - 1x10 – Al a vymezovací kroužek.

Lícovaný šroub je nutné dotáhnout, tak aby byl předeprnutý. K odhadnutí velikosti této síly lze užít vzorce pro min. zatížení ložisek.

Pro tuto aplikaci a ložiska SKF BA 6:

souč. min. zatížení [65]  
otáčky

$A = 0,000019$   
 $n = \text{max. } 24 \text{ min}^{-1}$

Min. axiální zatížení ložisek [65]:

$$F_{am} = A \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 = 0,000019 \cdot \left(\frac{24 \text{ min}^{-1}}{1000}\right)^2 = 0,000000010944 \text{ kN}$$

### Výpočet utahovacího momentu pro vyvození předpětí:

Pro nenamazaný závit: součinitel utahovacího momentu [2]  $K = 0,2$   
 průměr šroubu  $d = 4 \text{ mm}$

Min. utahovací moment [2]:

$$M = K \cdot F_{am} \cdot d = 0,2 \cdot 0,000010944 \text{ N} \cdot 0,004 \text{ m} = 0,0000000087552 \text{ Nm}$$

Z velikosti vypočítaného min. utahovacího momentu vyplývá, že šroub stačí předepnout velice mírně, avšak je vhodné zkontrolovat vůli mezičlenu, a to i po prvním testu vzorku tahem, aby nedocházelo při zatížení k prokluzu kuliček ložisek.

### Pevnostní analýza při tahové zkoušce vzorku

Omezujícím faktorem je zde způsob uchycení vzorku (aktuátoru TS), který je možný pouze pomocí závitu M2x0,4 (výpočet se vztahuje k tomuto kritickému místu), kvůli tomu není možné provádět zkoušky tahem s vyvozením větší hodnoty síly. Mezičlen pro tahovou zkoušku je navržen na max. možný tah 300 N. Návrhový součinitel bezpečnosti k MSP  $k_n = 1,3$ .

V případě nutnosti měření a vyvození většího tahového působení, lze návrh přepracovat, a to zejména změnou průměru všech závitů M2x0,4 na vyšší: spoj dolní pouzdro – pomocný člen vzorku, spoj pomocný člen vzorku – vzorek, spoj vzorek – topné těleso. Jelikož komponenty vzorku jsou opatřeny pouze závity M2x0,4, popř. průchozími otvory pro tyto šrouby, bude pravděpodobně nutná jiná forma uchycení při tahové zkoušce, např. pomocí speciálních upínek a svorek.

Při tomto přepracování návrhu bude zcela jistě nutné znovu zkontrolovat kritická místa celého ETZ při působení větší dané zatěžující tahové síle. Nedostačujícím článkem sestavy se tak pravděpodobně může stát i izolační váleček, který je při působení tlakové síly 2 000 N plně dostačující. Současný návrh ETZ je koncipován pro tah o hodnotě pouze 300 N.

Normálová síla	$N_{PČV} = 300 \text{ N}$
Průřez vnějšího závitu M2	$S_{PČV} = 2,794 \text{ mm}^2$
Součinitel tvaru (závit)	$\alpha_{PČV} = 4,2$

$$\sigma_N = \frac{N_{PČV}}{S_{PČV}} = \frac{300 \text{ N}}{2,794 \text{ mm}^2} = 107,373 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{N \max} = \sigma_N \cdot \alpha_{PČV} = 107,373 \text{ MPa} \cdot 4,2 = 450,966 \text{ MPa}$$

$$R_{ePČV \min} = |\sigma_{N \max}| \cdot k_n = 450,966 \text{ MPa} \cdot 1,3 = 586,256 \text{ MPa}$$

Kde:  $R_{ePČV \min}$  [MPa] min. potřebná mez kluzu materiálu pom. členu vzorku

Volba materiálu pomocného členu vzorku: ocel k zušlechťování 15 230.6  
 mez kluzu  $R_{e\ 15\ 230.6} = 635\ \text{MPa}$   
 tvrdost  $302\ \text{HV}$

Potom bezpečnost pom. členu vzorku k MSP:  $k_k = \frac{R_{e\ 15\ 230.6}}{\sigma_{pčV\ max}} = \frac{635\ \text{MPa}}{450,966\ \text{MPa}} = 1,41$

### Pevnostní kontrola spojení pom. členu vzorku s dolním pouzdrém pomocí 3 šroubů se zápusťnou hlavou ISO 7046-1 M2x10 – 4.8 – Z:

Normálová síla v 1 šroubu	$N_{\text{spoj}} = 300/3 = 100\ \text{N}$
Průřez vnějšího závitu M2	$S_{\text{spoj}} = 2,794\ \text{mm}^2$
Součinitel tvaru (závit)	$\alpha_{\text{spoj}} = 4,2$
Mez kluzu materiálu šroubu	$R_{e\ 4.8} = 320\ \text{MPa}$

$$\sigma_N = \frac{N_{\text{spoj}}}{S_{\text{spoj}}} = \frac{100\ \text{N}}{2,794\ \text{mm}^2} = 35,791\ \text{MPa}$$

$$\sigma_{N\ max} = \sigma_{\text{spoj}} \cdot \alpha_{\text{spoj}} = 35,791\ \text{MPa} \cdot 4,2 = 150,322\ \text{MPa}$$

$$k_k = \frac{R_{e\ 4.8}}{\sigma_{\text{spoj}\ max}} = \frac{320\ \text{MPa}}{150,322\ \text{MPa}} = 2,12$$

Z výpočtů vyplývá, že celkový součinitel bezpečnosti mezičlenu pro zkoušku tahem k MSP, při tahové síle 300 N,  $k_{k\ MSP} = 1,41$ . Avšak tuto hodnotu nelze brát za absolutní při měření vzorku, jelikož vnitřní závit M2 v aktuátoru TS je zhotoven v oceli AISi 316 L, která má mez kluzu  $R_e = 240\ \text{MPa}$ , i tvrdost je nižší oproti materiálu pomocného členu vzorku. Po dopočítání max. zatížení, které je závit aktuátoru schopen přenést, by se tedy navrhnul jiný materiál pomocného členu vzorku, s nižší mezí kluzu a zejména s nižší tvrdostí kvůli otlacení, čímž se ovšem sníží souč. bezpečnosti k MSP, popř. spoj nebude ani schopen přenášet tahovou sílu 300 N.

Výpočet těchto mezních hodnot je platný např. při testování samotného tepelně vodivého pláště, kdy se jeho horní disk upne k pomocnému členu pomocí podložky a matice.

## 10 Specifikace postupu měření a vyhodnocování měřených dat

Po dokonalém prvotním seřízení ETZ a všech měřících systémů je zařízení schopno provádět zkoušky vzorků, tj. zejména TS a tepelně vodivého pláště. Pro snazší sestavení jsou v důležitých konstrukčních uzlech voleny mírně větší vůle, aby bylo docíleno co nejideálnější souososti celé sestavy. V případě nedodržení tohoto předpokladu hrozí při zkoušce velké silové zatížení některých komponentů (od přídatného ohybového momentu), které může vést až k trvalým deformacím ETZ.

U všech typů zkoušek se předpokládá montáž přídatného měděného disku s implementovanými termočlánky, avšak je možné testování i se samostatným topným tělesem.

Pro zlepšení dosedací plochy aktuátoru TS se při tlakových zkouškách vzorku TS bez tepelně vodivého pláště doporučuje montáž pomocného členu vzorku (dále jen PČV), a to ještě před montáží vzorku k topnému tělesu (přídatnému disku).

### 10.1 Zkouška tlakem

Konfigurace ETZ při tlakové zkoušce viz. Obr. 38 Popis členů ETZ (tlaková zkouška).

Zkouška tlakem sestává z následujících základních bodů:

1. Ustavení (vystředění) TS a jeho montáž k přídatnému disku a topnému tělesu pomocí šroubů M2 vhodné délky – TS musí mít před začátkem zkoušky teplotu pod bodem tání parafínu použitého v daném TS, tudíž se aktuátor nachází ve své dolní poloze.
2. Jehla stavěcího šroubu je v kontaktu s PČV a délková hodnota naměřená snímačem polohy je vynulována.
3. Vynulování hodnoty tlakové síly naměřené snímačem síly, který v této fázi měří sílu od tíhy a sílu vyvozenou pružinou snímače polohy.
4. Vhodný rovný kousek plíšku o max. tl. 1 mm se přiloží k čelu mezičlenu pro zkoušku tlakem tak, aby jehla byla v jedné horizontální rovině s dosedací plochou mezičlenu. Poté se přestaví stavěcí šroub do pozice, kdy snímač polohy měří požadovanou hodnotu, tj. max. zdvih. V této pozici se přitáhne stanoveným utahovacím momentem matice přiléhající na přírubu.
5. Začátek zahřívání topného tělesa – manuální nastavení výkonu v rozmezí 1 W ÷ 20 W
6. Měření změny polohy aktuátoru, po dosednutí čela PČV k čelu mezičlenu měření vyvozené tlakové síly, měření teploty a zaznamenávání všech informací i s časovými údaji systémem sběru dat (ukládání do PC)
7. Ukončení testu – dosažení požadované teploty na základové desce TS – povolení matice stavěcího šroubu, odlehčení vzorku a ETZ

Při opakovaném testování shodného vzorku je možné další testování provádět bez kroků popsaných body 2, 3 a 4.

Základní vyhodnocení naměřených dat může představovat sestavení grafu polohy aktuátoru v závislosti na teplotě. Určení teploty kontaktu aktuátoru s čelem mezičlenu (dosažení max. zdvihu) a teploty sepnutí TS (vyvození síly cca 500 N). Dále také graf závislosti teploty na velikosti vyvozené tlakové síly a její max. hodnota (při 70 °C).

## 10.2 Zkouška tahem

Hlavní úkony zkoušky tahem po předchozí tlakové zkoušce:

1. Povolení nízké matice přiléhající k mezičlenu pro zkoušku tlakem a jeho demontáž, demontáž PČV ze vzorku
2. Vyjmutí kratší jehly ze stavěcího šroubu – nachází se v horní části šroubu pod kontaktním členem snímače polohy
3. Montáž PČV k předem sestavenému mezičlenu pro zkoušku tahem 3 šrouby
4. Montáž a dotažení nízkou maticí mezičlenu pro zkoušku tahem ke stavěcímu šroubu
5. Ustavení (vystředění) TS a jeho montáž k přídavnému disku a topnému tělesu pomocí šroubů M2 vhodné délky – TS má definovanou teplotu (dosaženo systémem automatické regulace teploty, popř. samovolným zchladnutím)
6. Vynulování naměřené hodnoty síly – vyvozené tíhou komponentů nad snímačem síly
7. Montáž PČV k aktuátoru TS pomocí závitu M2 za současného zašroubování stavěcího šroubu směrem dolů, dokud stykové plochy PČV a aktuátoru nedosednou, důležité je kontrolovat, zda při montáži naměřená síla tah/tlak je stále v oblasti nulové hodnoty
8. Vynulování délkového rozměru – hodnota naměřená snímačem polohy
9. Začátek vyvozování tahové síly pomocí stavěcího šroubu a měření posuvu – zaznamenávání systémem sběru dat
10. Ukončení zkoušky po dosažení požadovaného posuvu, popř. hodnoty vyvozené síly – opačný pohyb stavěcího šroubu k odlehčení vzorku – povolení nízké matice a demontáž mezičlenu pro zkoušku tahem od stavěcího šroubu, následná demontáž PČV společně s mezičlenem od aktuátoru

ETZ umožňuje také po bodu 8 jen aretaci stavěcího šroubu a při postupném samovolném ochlazování vzorku (např. z teploty 70 °C) měření vyvozovaného tahu. Což de facto simuluje zaseknutí aktuátoru v horní poloze, způsobené např. vnějším mechanickým vlivem.

Tato konfigurace je vhodná i k měření tuhosti samostatného tepelně vodivého pláště, k uchycení mohou sloužit závity M2 v topném tělese, popř. klipy, které se připevní do těchto závitů. Montáž k PČV se provede pomocí podložky a maticky.

Zjištěné charakteristiky získané tlakovými a tahovými zkouškami TS poslouží k porovnání mezi různými konfiguracemi TS, jakožto změnou max. zdvihu nebo rozličnými druhy použitého parafínu.

## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byl konstrukční návrh experimentálního zařízení, které bude vhodné pro testování kosmického tepelného spínače a jeho částí. Jak z kladených požadavků vyplynulo, toto zařízení má za úkol zkoušky tlakové i tahové za měnící se teploty. Požadavkem při tlakových zkouškách bylo také přesné nastavení max. zdvihu aktuátoru TS a následné měření změny této vzdálenosti až do doby, kdy se čelo aktuátoru opře o čelo stavěcího šroubu (mezičlenu pro zkoušku tlakem) a plynule se přechází do měření hodnoty vyvozeného tlaku. Při zkouškách tahových bylo požadavkem měření tahové síly vyvozené stavěcím pohybovým šroubem, potažmo vzorkem a měření jeho posuvu.

V první fázi návrhu byla provedena rozsáhlá analýza možností snímačů polohy a síly, které by vyhovovaly dané aplikaci. Díky této studii byl zvolen pro měření síly tenzometrický snímač a odporový (potenciometrický) snímač pro snímání polohy a vzdálenosti. Hlavním kritériem při výběru bylo dosažení přesnosti měření, rozsahu a v neposlední řadě cenová dostupnost.

Při návrhu automatické regulace a měření teploty se vycházelo z ověřeného systému použitého ve vakuové komoře, níž konstrukcí se zabýval ve své diplomové práci Ing. Jakub Mašek. Liší se pouze geometrie a konstrukce topného tělesa a přídatného disku, návrh obou součástí počítá s použitím čisté mědi.

Následná část práce řešila samotnou konstrukci experimentálního zařízení. Prvotní návrhy prošly razantními obměnami, zejména kvůli zástavbovým změnám snímače polohy tak, aby bylo dostačující použití pouze jednoho pro všechny druhy zkoušek vzorku bez nutnosti jej přemísťovat. Návrh měl také za cíl snadné sestavení a seřízení celého ETZ, což je dosaženo i nízkou výrobní náročností jednotlivých komponentů.

Rozsáhlá část návrhu se zabývala volbou materiálu vyráběných součástí a volbou pevnostně vhodného spojovacího materiálu. Řešení bylo získáno pevnostními analýzami, publikovány byly pouze početní výpočty kritických míst konstrukce. Byla provedena i celková kontrola pevnostní analýzy sestaveného ETZ za pomoci softwaru Autodesk Inventor Professional 2017.

Návrh konfigurace pro tlakové zkoušky splnil požadavky. Při návrhu zkoušky TS tahem nebylo dosaženo požadavku na možnost vyvození tahové síly až 1000 N z důvodu poddimenzovaného spojení s aktuátorem TS pomocí jeho vnitřního závitu, bylo navrženo možné řešení, které je však nutné odzkoušet spíše přímo na reálném TS a sestaveném ETZ.

Po prvotním sestavení a seřízení ETZ by v rámci kalibrace bylo dobré přímo pomocí snímače polohy změřit celkové stlačení (prodloužení) komponentů ETZ při max. silovém a teplotním zatížení, což by dávalo upřesňující, vypovídající a reálnou hodnotu, díky které by bylo možno ještě testování vzorků zpřesnit.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAŠEK, Jakub. Qualification Test of Heat Switch for Martian Conditions. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Strojního inženýrství, 2016, 129 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Robert Popela, Ph.D.
- [2] SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. Konstruování strojních součástí. Vyd. 1. Brno : Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] McSween, Harry; Moersch, Jeffrey; Burr, Devon; Dunne, William; Emery, Joshua; Kah, Linda; McCanta, Molly (2019). Planetary Geoscience. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 300–306. ISBN 9781107145382.
- [4] BENEŠ, Antonín, František DRASTÍK, Zdeněk HOSTINSKÝ, Jaroslav KOUTSKÝ a Josef NĚMEC. Nauka o kovech: učebnice pro elektrotechn. fakulty. Praha: SNTL, 1972, 355 s.
- [5] Löffelmann, František & Šplíchal, Jan. (2019). Design study of the heat switch base plate with single and multi-material topology optimization. 85-97. 10.13164/conf.read.2018.9.
- [6] ESA SOW HEAT SWITCH. Statement of Work, Miniaturised Heat Switch, Annex 1: Preliminary Functional Specification. European Space Agency: AG Noordwijk zh, The Netherlands, published: 11. 05. 2011, 24 pages. TEC-MTT/2011/3756/In/SL. Appendix 1 to ITT 1-6801/11/NL/NA
- [7] NASA: Mars Exploration – Mars facts [online]. [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <http://mars.nasa.gov/allaboutmars/facts/>
- [8] Chuss, David T. (June 26, 2008), Cosmic Background Explorer, NASA Goddard Space Flight Center, archived from the original on May 9, 2013, [online]. [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20130509235348/http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>
- [9] About ESA [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.esa.int/>.
- [10] Johann-Dietrich Woerner je novým generálním ředitelem ESA [online]. 2015 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Czech\\_Republic/Johann-Dietrich\\_Woerner\\_je\\_novym\\_generalnim\\_reditelem\\_ESA](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Czech_Republic/Johann-Dietrich_Woerner_je_novym_generalnim_reditelem_ESA)
- [11] Co je ESA? [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Czech\\_Republic/Co\\_je\\_ESA](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Czech_Republic/Co_je_ESA)
- [12] Mars Odyssey [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://mars.nasa.gov/odyssey/>
- [13] Mars Express Frequently Asked Questions (FAQs) [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: [http://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Mars\\_Express/Frequently\\_asked\\_questions2](http://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Mars_Express/Frequently_asked_questions2)
- [14] Mars Reconnaissance Orbiter [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://mars.nasa.gov/mro/>
- [15] Why India Going to Mars [online]. 2013 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.nytimes.com/2013/11/23/opinion/india-must-go-to-mars.html>
- [16] Maven [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/maven/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/maven/main/index.html)
- [17] Místa přistání sond na Marsu [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://space.winsoft.cz/sondy/mars/>
- [18] Missions to mars [online]. 2019 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://exploration.esa.int/web/mars/-/56504-missions-to-mars>

- [19] Curiosity Rover Mission Overview [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://mars.nasa.gov/msl/mission/overview/>
- [20] Mars Insight Mission [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://mars.nasa.gov/insight/timeline/landing/summary/?site=insight>
- [21] Mars lander smashed into ground at 540Km/h after misjudging its altitude [online]. 2016 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/science/2016/nov/24/mars-lander-smashed-into-ground-at-540kmh-after-misjudging-its-altitude>
- [22] Evropská sonda dopadla na povrch Marsu rychlostí 540 km/h. Počítač se spletl [online]. 2016 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/veda-skoly/clanek/evropska-sonda-dopadla-na-povrch-marsu-rychlosti-540-km-h-pocitac-se-spletl-13624>
- [23] No 6-2020: ExoMars to také off for the Red Planet in 2022 [online]. 2020 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: [https://www.esa.int/Newsroom/Press\\_Releases/ExoMars\\_to\\_take\\_off\\_for\\_the\\_Red\\_Planet\\_in\\_2022](https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/ExoMars_to_take_off_for_the_Red_Planet_in_2022)
- [24] Mars Exploration Rover - Opportunity [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.jpl.nasa.gov/missions/mars-exploration-rover-opportunity-mer/>
- [25] Russia continues works on ExoMars lander design [online]. 2019 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <http://russianspaceweb.com/exomars2018-2017.html>
- [26] Mars Exploration Rovers [online]. 2014 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <http://planety.astro.cz/mars/2413-mars-exploration-rovers>
- [27] Trajektorie letu na Mars [online]. © 2010 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <http://marie.palmer.sweb.cz/KMARSU.html>
- [28] Mars 2020 Mission Perseverance Rover [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://mars.nasa.gov/mars2020/>
- [29] China shows first images of Mars rover, aims for 2020 mission [online]. 2016 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/article/us-china-space-mars-idUSKCN10Z07B>
- [30] Čína navzdory pandemii COVID-19 pokračuje v přípravách mise na Mars [online]. 2020 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/cina-navzdory-pandemii-covid-19-pokracuje-v-pripravach-mise-na-mars/sc-870-a-202915/default.aspx>
- [31] China Plans 39 Million\_Mile Race to Mars to catch up With NASA [online]. 2020 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.bloomberg.com/graphics/2020-international-mars-exploration/>
- [32] LAZAR, Václav. Calibration task of experimental device for space technology testing [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-03-21]. Available: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117060>. Master's Thesis. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Aerospace Engineering. Supervisor: Ing. Jakub Mašek.
- [33] Základy přenosu tepla [online]. 2019 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://docs.google.com/presentation/d/1HYuLsP8HUzJEJCSFI3LQVfNhumUEHiYAJqY1RB56BJU/edit#slide=id.p7>
- [34] Přenos tepla vedením tepla [online]. 2019 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: [https://docs.google.com/presentation/d/1YjLZzABYOB0hNGQcYn9OYhm3I9MLqbUwtLU\\_ZtgqxZg/edit#slide=id.p9](https://docs.google.com/presentation/d/1YjLZzABYOB0hNGQcYn9OYhm3I9MLqbUwtLU_ZtgqxZg/edit#slide=id.p9)
- [35] Charakteristika korozivzdorných materiálu [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>



- [36] Nerezová ocel [online]. [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14404.html>
- [37] Hliníkové slitiny [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.primapol.cz/produkty/hlinik/>
- [38] Koroze [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: [https://www.spszengrova.cz/texty/texty/ZAV/ZAV1-Povrchove\\_upravy.pdf](https://www.spszengrova.cz/texty/texty/ZAV/ZAV1-Povrchove_upravy.pdf)
- [39] Dokument pdf: Arescosmo „Heat Switches failure report“
- [40] List Microsoft Excel: 2020\_02 Experimental test facility development requirements (loads measurement)
- [41] Konfokální dvoukanálový kontrolér confocalDT [online]. 2017 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/konfokalni-dvoukanalovy-kontroler-confocaldt.html>
- [42] confocalDT [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/confocal-sensor/>
- [43] capaNCDT [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/capacitive-sensor/>
- [44] optoNCDT [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/download/products/cat--optoNCDT--en.pdf>
- [45] Magneto-indukční snímače polohy [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/magneto-inductive-sensor/>
- [46] Bezkontaktní indukční snímače přiblížení [online]. 2014 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/indukcni-snimace-priblizeni-obecny-popis.html>
- [47] Snímače na principu vířivých proudů [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/eddy-current-sensor/>
- [48] eddyNCDT [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/download/products/cat--eddyNCDT--en.pdf>
- [49] induSENSOR [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/download/products/cat--induSENSOR--en.pdf>
- [50] Potenciometrické snímače [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.megatron.cz/kategorie/senzorika/linearni-snimace-polohy/potenciometricke-snimace>
- [51] Lankové snímače [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.megatron.cz/kategorie/senzorika/linearni-snimace-polohy/lankove-snimace>
- [52] wireSENSOR [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/draw-wire-sensor/>
- [53] Nejmenší lankový snímač [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nejmensi-lankovy-snimac.html>
- [54] Data Sheet for Linear Sensors SPR18-50 [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: [https://www.megatron.cz/coku8a2er/uploads/2017/02/DS\\_SPR18\\_en.pdf](https://www.megatron.cz/coku8a2er/uploads/2017/02/DS_SPR18_en.pdf)
- [55] Snímače a sensory mechanických veličin [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/kategorie/snimace-a-senzory-mechanickyh-velicin/>
- [56] Datový list: Snímač síly Série KS [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: [https://www.gtm-gmbh.com/fileadmin/media/dokumente/produkte/datenblaetter/cz/List\\_Serie\\_KS\\_20150507.pdf](https://www.gtm-gmbh.com/fileadmin/media/dokumente/produkte/datenblaetter/cz/List_Serie_KS_20150507.pdf)

- [57] Crydom 1-DC Series [online]. © 2013 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/b7ad3a4e9341733e615872ed74bfd6b9/1-DC-7-40A-series.pdf>
- [58] Návod k obsluze Ht40P programový regulátor [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: [https://www.hbm.cz/kategorie/snimace-a-senzory-mechanickych-velicin/https://www.lac.cz/getattachment/Pece-a-susarny/Servis/Regulatory-a-navody-k-regulatorum/Ht40P/Ht40P\\_navod\\_cz.pdf.aspx](https://www.hbm.cz/kategorie/snimace-a-senzory-mechanickych-velicin/https://www.lac.cz/getattachment/Pece-a-susarny/Servis/Regulatory-a-navody-k-regulatorum/Ht40P/Ht40P_navod_cz.pdf.aspx)
- [59] Resistor R 8R TO220 35W 1% HITANO [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.gmelectronic.com/r-8r-to220-35w-1-hitano>
- [60] Platinum Temperature Sensor with flat wires P0K1.202.3FW.A.007 [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.gmelectronic.com/r-8r-to220-35w-1-hitano>  
[http://www.farnell.com/datasheets/1643992.pdf?\\_ga=2.255908685.737882919.1592240675-472466162.1592240675](http://www.farnell.com/datasheets/1643992.pdf?_ga=2.255908685.737882919.1592240675-472466162.1592240675)
- [61] ESA Messtechnik GmbH ESAM TRAVELLER 1 CF [online]. © 2017 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://esa-messtechnik.de/pdf/Data%20Sheet%20Traveller%20CF%202017.pdf>
- [62] Piezoelektrické snímače síly [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: [http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/sila/sila\\_piezoelektricke\\_snimace.htm](http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/sila/sila_piezoelektricke_snimace.htm)
- [63] PACeline DFT [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/produkty/piezi-snimacel-sil-paceline-a-prislusenstvi/paceline-cft/>
- [64] alkalický polyamid silon PA6 G [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://shop.plmont.com/alkalicky-polyamid-silon-pa6-g-tyce-prumer-160-mm/>
- [65] Minimální zatížení axiálních kuličkových ložisek [online]. © 2007 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: [https://www.arkov.cz/getattachment/4c979758-64b2-4b17-88d6-afb03ab3a85b/Hlavni-katalog-SKF-\(CZ\)](https://www.arkov.cz/getattachment/4c979758-64b2-4b17-88d6-afb03ab3a85b/Hlavni-katalog-SKF-(CZ))

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$\partial T$	Změna teploty	K
$\partial x$	Elementární délková změna	m
A	Součinitel min. zatížení	-
D,d	Průměr	m
e	Excentricita	m
E	Youngův modul pružnosti v tahu	Pa
F	Síla	N
H	Výška	m
$I_{real.}$	Reálný proud	A
$I_{teor.}$	Teoretický proud	A
K	Součinitel utahovacího momentu	-
$k_k$	Součinitel bezpečnosti	-
$k_n$	Návrhový součinitel bezpečnosti	-
L	Délka	m
M	Moment	Nm
$M_o$	Ohybový moment	Nm
n	Otáčky	$s^{-1}$
N	Normálová síla	N
p	Tlak	Pa
$Q_{real.}$	Reálný tepelný výkon	W
$Q_{teor.}$	Teoretický tepelný výkon	W
$R_K$	Kontaktní tepelný odpor	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
S	Plocha kolmá k tepelnému toku	$m^2$
S	Průřez, plocha	$m^2$
$S_p$	Stlačovaná plocha	$m^2$
t	Čas	s
T	Termodynamická teplota	K
U	Napětí	V
z	Počet činných závitů	-
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\vec{Q}$	Tepelný tok	W, J·s
$\alpha_T$	Teplotní roztažnost	$K^{-1}$
$\alpha_{M_o}$	Součinitel tvaru pro ohybový moment	-
$\alpha_N$	Součinitel tvaru pro normálovou sílu	-

$J_y, J_x$	Osový kvadratický moment	$m^4$
$\sigma_{Mo}$	Normálové napětí od ohybu	Pa
$\sigma_N$	Normálové napětí od normálové síly	Pa
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	Pa
$R_e$	Mez kluzu v tahu	Pa
$\sigma_{Mo \max}$	Max. normálové napětí od ohybu	Pa
$\sigma_N \max$	Max. normálové napětí od normálové síly	Pa
$\sigma_{\max}$	Celkové max. normálové napětí	Pa

**Zkratka****Název**

% m.r.	Procento měrného rozsahu
A / D	Analogově / digitální
AC	Střídavé
CNSA	Čínská národní kosmická agentura
DC	Stejnoseměrné
EAC	Evropské středisko kosmonautů ESA
ESA	Evropská kosmická agentura
ESAC	Středisko ESA
ESOC	Středisko ESA
ESRIN	Středisko ESA
ESTEC	Středisko ESA
ETZ	Experimentální testovací zařízení
GNSS	Navigační systém Galileo
GSC	Kosmické centrum pro start raket ESA
ISRO	Indická kosmická agentura
Max.	Maximální
Min.	Minimální
MS	Mezní stav
MSP	Mezní stav pružnosti
MSVS	Mezní stav vzpěrné stability
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (americká vládní agentura)
PČV	Pomocný člen vzorku
Pom.	Pomocný
Roskosmos	Státní korporace pro kosmické aktivity (ruská vládní agentura)
Souč.	Součinitel
TI.	Tloušťka
TS	Tepelný spínač
USA	Spojené státy Americké
VUT	Vysoké učení technické

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

- Obr. 1 Kosmický tepelný spínač
- Obr. 2 Základní prvky kosmického tepelného spínače
- Obr. 3 Svislý řez tepelným spínačem
- Obr. 4 Rozpracovaný svařenec
- Obr. 5 Ustavení dolního pouzdra
- Obr. 6 Vlnkové pružiny s podložkou
- Obr. 7 Horní pouzdro
- Obr. 8 Pružiny na dolním pouzdře
- Obr. 9 Zakrytované pružiny (+ základová deska)
- Obr. 10 Tepelně vodivý plášť
- Obr. 11 Základová deska
- Obr. 12 Tepelný spínač, pohled: a) zepředu b) shora c) izometrický
- Obr. 13 Sestava tepelného spínače a dvou měděných desek
- Obr. 14 Trajektorie letu k Marsu
- Obr. 15 Mise na Mars (vyjma neúspěšných a částečně úspěšných) [31]
- Obr. 16 Nelinearita snímačů
- Obr. 17 Potenciometrické snímače CLP21 firmy Megatron [50]
- Obr. 18 Jedna z možných konstrukcí a umístění indukčních snímačů [49]
- Obr. 19 Princip snímače využívajícího vířivých proudů [47]
- Obr. 20 Snímač vazební (vlevo) a nevazební (vpravo) [46]
- Obr. 21 Zástavba nevazebního snímače na principu vířivých proudů [48]
- Obr. 22 Magneto-indukční snímač [45]
- Obr. 23 Některé typy konstrukcí kapacitních snímačů [43]
- Obr. 24 Princip laserového snímače [44]
- Obr. 25 Radiální (nahore) a axiální (dole) konfokální snímač [42]
- Obr. 26 Lankové snímače [53]
- Obr. 27 Snímač polohy Megatron SPR 18-50 – K [54]
- Obr. 28 Tenzometrické snímače tahu-tlakové síly firmy HBM různých provedení [55]
- Obr. 29 Piezoelektrický snímač síly firmy HBM [63]
- Obr. 30 Snímač síly GTM série KS 2,5 kN [56]
- Obr. 31 DC relé CRYDOM D4D07
- Obr. 32 Regulátoru teploty Ht40P
- Obr. 33 Sérioparalelní zapojení 4 rezistorů
- Obr. 34 Rezistor R 8R TO220 35W 1% HITANO [59]
- Obr. 35 Teplotní sonda Pt 100 [60]
- Obr. 36 Rozmístění teplotních sond Pt100
- Obr. 37 Systém sběru dat ESAM Traveller 1 CF [61]
- Obr. 38 Popis členů ETZ (tlaková zkouška)
- Obr. 39 Silové zatížení rámu
- Obr. 40 Horní strana topného tělesa a dolní strana topného tělesa s rezistory
- Obr. 41 Sílové působení
- Obr. 42 Pohled na horní část stavěcího šroubu
- Obr. 43 Excentrické působení zatěžující síly
- Obr. 44 VVÚ, nejnebezpečnější místo A na povrchu šroubu (podél závitu)
- Obr. 45 Pohled na konfiguraci při tlakové zkoušce
- Obr. 46 Příruba
- Obr. 47 Držák snímače polohy
- Obr. 48 Konfigurace při tahové zkoušce vzorku
- Obr. 49 Komponenty mezičlenu pro zkoušku tahem

**SEZNAM TABULEK**

- Tab. 1 Komponenty tepelného spínače
- Tab. 2 Specifikace snímače Megatron 18-50 – K [54]
- Tab. 3 Specifikace snímače GTM série KS 2,5 kN [56]
- Tab. 4 Hodnoty teoretického výkonu pro nastavení a reálného výkonu pro rezistorový obvod [1]
- Tab. 5 Specifikace DC relé CRYDOM D4D07 [57]
- Tab. 6 Specifikace regulátoru teploty Ht40P – TE – K0R - 000 [58]
- Tab. 7 Specifikace rezistoru R 8R TO220 35W 1% HITANO [59]
- Tab. 8 Specifikace DC napájecího zdroje Mc Voice [1]
- Tab. 9 Specifikace teplotní sondy Pt 100: P0K1 – 202 – 3FW [60]
- Tab. 10 Specifikace systému sběru dat ESAM Traveller 1 CF verze 2.5 [61]
- Tab. 11 Specifikace vstupního odporového adaptéru pro měření teploty

## SEZNAM PŘÍLOH

1. Seznam vybavení na objednávku
2. Výkresová dokumentace
  - 2.1. Sestava ETZ pro zkoušku tlakem
  - 2.2. Sestava ETZ pro zkoušku tahem
    - 2.2.1. Podsestava mezičlenu pro zkoušku tahem
  - 2.3. Výkresy součástí
    - 2.3.1. Stavěcí šroub
    - 2.3.2. Topné těleso
    - 2.3.3. Držák snímače polohy
3. 3D modely
  - 3.1. Sestava ETZ pro zkoušku tlakem
  - 3.2. Sestava ETZ pro zkoušku tahem
    - 3.2.1. Podsestava mezičlenu pro zkoušku tahem
  - 3.3. Vyráběné součásti
    - 3.3.1. Dolní kruhová deska
    - 3.3.2. Dolní pouzdro
    - 3.3.3. Držák snímače polohy
    - 3.3.4. Horní kruhová deska
    - 3.3.5. Horní pouzdro
    - 3.3.6. Izolační váleček
    - 3.3.7. Jehla dlouhá
    - 3.3.8. Jehla krátká
    - 3.3.9. Mezičlen pro zkoušku tlakem
    - 3.3.10. Podložka pro jehlu
    - 3.3.11. Pomocný člen vzorku
    - 3.3.12. Přídavný disk
    - 3.3.13. Příruba
    - 3.3.14. Sloupek
    - 3.3.15. Stavěcí šroub
    - 3.3.16. Topné těleso
    - 3.3.17. Tyč kličky
    - 3.3.18. Vymezovací kroužek