



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VYUŽITÍ VZDUCHU JAKOŽTO MĚŘICÍHO MEDIA PRO DETEKCI NETĚSNOSTI V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

THE USE OF AIR AS A MEASURING MEDIA FOR THE DETECTION OF  
LEAKS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Jan BABICKÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. Jaromír DVOŘÁK, Ph.D.**

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/14

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Babický

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

### **Využití vzduchu jakožto měřicího media pro detekci netěsností v automobilovém průmyslu**

v anglickém jazyce:

#### **The use of air as a measuring media for the detection of leaks in the automotive industry**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Popis a význam tlaku jakožto fyzikální veličiny
3. Využití vzduchu v měřicí technice
4. Těsnost vs. netěsnost – základní požadavky a rozdělení v průmyslové praxi
5. Zkoušky těsnosti – druhy zkoušek, jejich použitelnost, citlivost, pozitiva a negativa
6. Zkoušky těsnosti prováděné vzduchem a jejich využití v automobilovém průmyslu
7. Porovnání zkoušek těsnosti na bázi vzduchu
8. Porovnání použitých hřídelových těsnících kroužků v aplikacích systému Common Rail – vysokotlaké vstřikovací čerpadlo CPN5
9. Rozbor současné problematiky u vysokotlakých vstřikovacích čerpadel CPN5 – zavedení nového typu hřídelového těsnícího kroužku
10. Návrh vhodné metodiky pro měření těsnosti hřídelových těsnících kroužků s PTFE břity – pozitiva vs. negativa
11. Experimentální část práce (porovnání nejvhodnějších metod, analýza zkušebních parametrů, odhalitelnost poškození, měřicí tolerance, atd.)
12. Vyhodnocení experimentů, doporučení pro praktické aplikace a další využití ve firmě Bosch diesel, s.r.o
13. Závěr

Cíle bakalářské práce:

Porovnání použitelných hřídelových těsnění v CPN5 pumpách a měřících metod pro detekci netěsnosti těchto hřídelových těsnění.

Seznam odborné literatury:


1. LIŠKA, Antonín a Pavel NOVÁK. Technika stlačeného vzduchu. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1999, 361 s. ISBN 8001019470.
2. HOCH, Václav. Technika stlačeného vzduchu. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1988, 238 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 28.11.2013



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

**ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá vlastnostmi a využitím vzduchu, jakožto měřicího média při detekci a ověřování míry netěsnosti měřené soustavy. Cílem práce je se všeobecně seznámit s metodami detekce míry netěsnosti, které se v široké technické praxi využívají a s vlivy, které toto měření mohou, někdy i zásadně, ovlivňovat. Detailněji se práce zabývá metodami, které využívají jako zkušební medium stlačený vzduch. Praktickým cílem bakalářské práce je porovnání měřících metodik, popř. návrh nové metodiky pro detekci míry netěsnosti hřídelových těsnění vysokotlakých čerpadel systému Common rail, vyráběných firmou Bosch Diesel s.r.o. v Jihlavě, konkrétně u produktové řady CPN5.

**Klíčová slova**

Tlak, vzduch, míra netěsnosti, hřídelový těsnící kroužek, detekce netěsnosti

**ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the attributes and usage of air, as a measurement medium for detection and verifying of the leakage range of the measured composition. The goal of this thesis is to generally learn about the detection methods of the leakage range, which are used in the broad technical praxis and about the effects, which can sometimes substantially influence this measurement. In detail, this thesis deals with methods, which use as a testing medium compressed air. The practical goal of this bachelor thesis is the comparison of the measurement methods, alternatively proposal of a new method for the detection of the leakage range of the shaft sealing of the common rail high-pressure pumps, manufactured by the company Bosch Diesel s.r.o. in Jihlava, specifically at product series CPN5.

**Key words**

Pressure, air, leak, shaft sealing ring, leakage test

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BABICKÝ, Jan. *Využití vzduchu jakožto měřicího media pro detekci netěsností v automobilovém průmyslu*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 45 s. Vedoucí práce Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Využití vzduchu jakožto měřicího media pro detekci netěsností v automobilovém průmyslu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Jan Babický

**PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D. a panu Ing. Michalu Buksovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ.....	7
ÚVOD.....	10
1 POPIS A VÝZNAM TLAKU JAKOŽTO FYZIKÁLNÍ VELIČINY .....	11
1.1 Tlak .....	11
1.2 Atmosférický tlak.....	12
1.3 Hydrostatický tlak .....	13
1.4 Jednotky tlaku .....	14
2 VYUŽITÍ VZDUCHU V MĚŘICÍ TECHNICE .....	15
3 MÍRA NETĚSNOSTI A NEGATIVNÍ VLIVY NA JEJÍ URČENÍ.....	16
3.1 Míra netěsnosti .....	16
3.2 Vlivy působící na určení hodnoty míry netěsnosti.....	18
3.2.1 Vliv tlaku .....	18
3.2.2 Vliv teploty .....	18
3.2.3 Termodynamické jevy .....	19
4 URČENÍ MÍRY NETĚSNOSTI.....	20
4.1 Normy pro zkoušení míry netěsnosti .....	20
4.1.1 Lokalizace netěsnosti .....	20
4.1.2 Měření míry netěsnosti .....	20
4.1.3 Dovolené míry netěsnosti .....	22
4.2 Zkoušení míry netěsnosti ve firmě Bosch Diesel, s.r.o.....	22
5 METODY DETEKCE MÍRY NETĚSNOSTI .....	24
5.1 Druhy zkoušek těsnosti .....	24
5.1.1 Akustická metoda .....	24
5.1.2 Bublínkový test.....	25
5.1.3 Detekce za pomoci značkovacího plynu.....	25
5.1.4 Heliová vakuová zkouška .....	26
5.2 Druhy zkoušek těsnosti prováděných vzduchem.....	27
5.2.1 Metoda absolutního měření poklesu tlaku .....	27
5.2.2 Metoda diferenčního měření poklesu tlaku .....	28
6 MĚŘICÍ PŘÍSTROJ PRO ZJIŠTĚNÍ MÍRY NETĚSNOSTI .....	30
6.1 Hlavní parametry .....	30
6.2 Technické parametry.....	31



6.3 Všeobecné možnosti využití přístrojů firmy ATEQ .....	31
7 DIESELOVÉ ČERPADLO CPN5 A TĚSNÍCÍ KOMPONENTY .....	33
7.1 Rozdělení čerpadel CPN5 .....	33
7.2 Hřídelové těsnící kroužky (HTK) .....	35
7.3 Těsnící kroužky s PTFE břity .....	36
8 ROZBOR SOUČASNÉ PROBLEMATIKY MĚŘENÍ MÍRY NETĚSNOSTI V OBLASTI CPN5 .....	37
9 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE .....	38
ZÁVĚR .....	43
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	44
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	45

## ÚVOD

Vzduch je směsí plynů, kapalných i pevných částic, které tvoří plynný obal naší planety. Vzduch se nachází všude kolem nás a pro většinu živých organismů včetně člověka je nepostradatelný.

Stejně tak je i významnou součástí velkého množství průmyslových odvětví. Ať už jako surovina pro výrobu technických plynů, kyslíku, dusíku a argonu, jako plyn pro čisticí operace nebo v neposlední řadě jako plyn pro různá měření ve výrobních oblastech. Vzduch je v průmyslovém odvětví využíván ve velkém množství, protože je snadno dostupný, levný pro provoz, ekologicky nezávadný a pro člověka zcela běžný.

Svou bakalářskou práci na téma *Využití vzduchu jakožto měřicího media pro detekci netěsností v automobilovém průmyslu* jsem vytvářel ve firmě Bosch Diesel s.r.o. Jihlava, kde jsem se mohl částečně aktivně zúčastnit výzkumu v této oblasti.

Cílem této práce bylo zmapování různých metod pro měření míry netěsností, seznámení se všemi vlivy, které hrají důležitou roli při testování míry netěsnosti a také praktické zkoumání, je-li detekce míry netěsnosti pomocí vzduchu prokazatelnou zkouškou, která by mohla nahradit bublinkový test. Tento test se v současné době ve firmě Bosch Diesel s.r.o. používá (společně s dalšími metodami zkoušek) pro měření míry netěsnosti u vysokotlakých čerpadel produktové řady CPN5.

# 1 POPIS A VÝZNAM TLAKU JAKOŽTO FYZIKÁLNÍ VELIČINY

## 1.1 Tlak

Tlak, obvykle označován  $p$  (z latinského *pressura*), je jednou ze základních fyzikálních veličin v technice. Je definován jako síla  $F$  působící kolmo na plochu a rovnoměrně rozloženou na této ploše.[1]

Tlak se často zaměňuje se svým původcem a to tlakovou silou. S pomocí tlakové síly se tlak obvykle stanovuje. [2]

Je-li tlak rozložen rovnoměrně na plochu  $S$ , potom platí následující vztah (1.1)

$$p = \frac{F}{S} \text{ [Pa]} \quad (1.1),$$

kde:  $F$  [N] - síla působící kolmo na plochu,

$S$  [m<sup>2</sup>] - plocha.

Pokud tlak není rozložen rovnoměrně, uvažujeme tlak v daném bodě jako diferenciální podíl. Potom platí vztah (1.2)

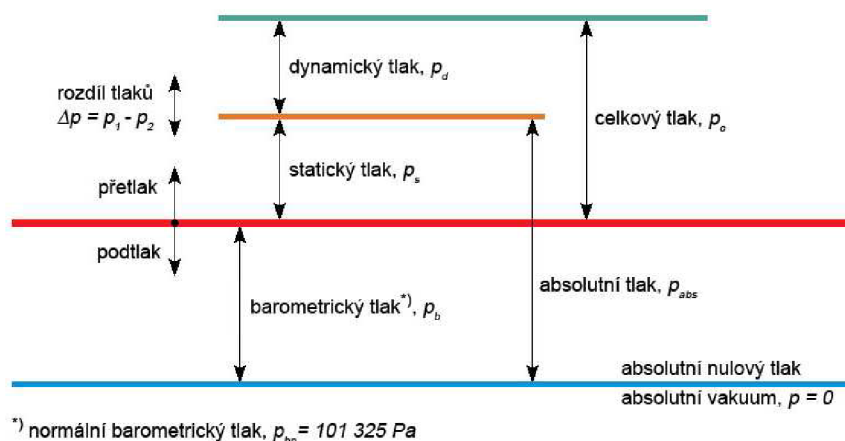
$$p = \frac{dF}{dS} \text{ [Pa]} \quad (1.2),$$

kde:  $dF$  [N] - element síly  $F$ ,

$dS$  [m<sup>2</sup>] - element plochy  $S$ . [1]

Při výpočtech je vždy nutno znát informaci, o který tlak se jedná. V běžné praxi je slovem tlak často označován přetlak vůči okolnímu atmosférickému tlaku. [3]

Tlak je možné uvádět dvěma možnými způsoby. Za prvé jako absolutní tlak, který se měří od nulové hodnoty tlaku. Za druhé jako tlak relativní, takzvaný přetlak nebo podtlak, který se měří od okamžitého barometrického tlaku (Obr. 1-1). [1]



Obr. 1-1 Základní rozdělení tlaků [1]

**$p_b$ , barometrický tlak** – tlak vzduchu v daném místě za skutečných podmínek.

**$p_{abs}$ , absolutní tlak** – tlak měřený od absolutní tlakové nuly.

**Absolutní nulový tlak (absolutní vakuum)** – teoretický nulový tlak v prostoru dokonale zbaveném jakýchkoliv hmotných částic.

**$p_s$ , statický tlak** – v celém průtočném průřezu stejný.

**$p_d$ , dynamický tlak** – zahrnuje vliv stlačitelnosti tekutiny.

**$p_c$ , celkový tlak** – je roven součtu statického a dynamického tlaku.

**Přetlak** – rozdíl barometrického tlaku a tlaku absolutního, který je vyšší než barometrický.

**Podtlak** – rozdíl barometrického tlaku a tlaku absolutního, který je nižší než barometrický.

**$\Delta p$ , rozdíl tlaku (tlaková difference)** – rozdíl dvou tlaků, z nichž ani jeden není shodný s tlakem barometrickým.

**Vakuum** – fyzikální pojetí takto označuje jakýkoliv tlak nižší než barometrický. [1]

## 1.2 Atmosférický tlak

V běžném prostředí jsme vystaveni účinkům tlaku okolního vzduchu, který je označován pojmem atmosférický tlak. Atmosférický tlak je smluvní hodnota, která odpovídá průměrnému tlaku vzduchu při hladině moře. Tento tlak lze určit jako tíhu myšleného vzduchového sloupce nad každým čtverečním metrem vodorovné plochy

od povrchu země až po hranice atmosféry. Normální atmosférický tlak při hladině moře je  $p_{a0}=101,325$  kPa. Se vzrůstající nadmořskou výškou se zmenšuje výška vzduchového sloupce, ležícího nad určitým místem. Z tohoto důvodu klesá atmosférický tlak a klesá i hustota vzduchu. Ve výšce přibližně 5 500 m je atmosférický tlak zhruba poloviční než tlak při mořské hladině. Z toho plyne, že i když hranice atmosféry sahá mnohem výše, polovina její hmotnosti je soustředěná do výšky menší než 6 000 m. Pokles tlaku s nadmořskou výškou není lineární. V nižších oblastech je pokles tlaku rychlejší, než pokles tlaku ve vyšších místech atmosféry. Tato nelineárnost je způsobena stlačitelností vzduchu. [3]

### 1.3 Hydrostatický tlak

Tlak ovzduší je samozřejmě přenášen i do vody. Těsně pod hladinou je tlak ve vodě roven tlaku atmosférickému  $p_{a0}$ . Se zvětšující se hloubkou se však zvětšuje i sloupec vody nad daným místem a tlaková síla, působící na myšlenou vodorovnou plochu, se zvětší o hodnotu, která odpovídá tíze sloupce vody nad touto myšlenou plochou.

Tento přírůstek tlaku, který je dán kapalinou v tíhovém poli, se nazývá hydrostatický tlak. [3]

U kapalin se proto tlak vyjadřuje hydrostatickým tlakem sloupce tekutiny. Tlak v hloubce  $h$  pod hladinou je určen následujícím vztahem (1.3). [1]

$$p = h \times \rho \times g \text{ [Pa]} \quad (1.3),$$

kde:  $\rho$  [ $\text{kg}\times\text{m}^{-3}$ ] - hustota kapaliny,  
 $g$  [ $\text{m}\times\text{s}^{-2}$ ] - tíhové zrychlení,  
 $h$  [m] - hloubka.

Objem sloupce vody nad vodorovnou plochou o plošném obsahu  $S$  ležící v hloubce  $h$  se vypočítá vztahem (1.4):

$$V_h = h \times S \text{ [m}^3\text{]} \quad (1.4),$$

kde:  $h$  [m] - hloubka,  
 $S$  [ $\text{m}^2$ ] - obsah myšlené vodorovné plochy.

#### 1.4 Jednotky tlaku

Základní jednotkou tlaku v soustavě SI je Pascal [Pa]. 1 Pascal je definován jako tlak síly o velikosti 1 N na plochu 1 m<sup>2</sup>, kolmé ke směru síly.

$$1Pa = 1N \times m^{-2} = 1kg \times m^{-1} \times s^{-2}$$

V praxi je jednotka 1 Pa velmi malá, a proto se většinou setkáme s násobky této základní jednotky jako je např. kPa, MPa, případně GPa. Pro vyjádření tlaku barometrického se používá jednotka hPa. [1]

Ve starší literatuře se můžeme setkat i s jinými jednotkami, jako je např. kp/cm<sup>2</sup>, atmosféra (atm) a bar. V anglosaské literatuře jsou používány jednotky psi (pounds per square inch - tzn. libra na čtvereční palec). [3]

Jednotky tlaku a jejich přepočty:

$$1 \text{ kp/cm}^2 = 98,0665 \text{ kPa,}$$

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa,}$$

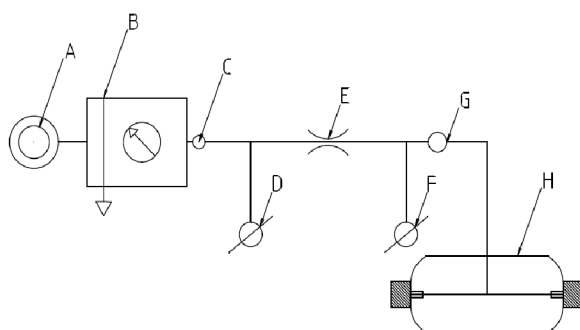
$$1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa,}$$

$$1 \text{ Mpa} = 1000 \text{ kPa} = 1\,000\,000 \text{ Pa,}$$

$$1 \text{ psi} = 6,89475 \text{ kPa.}$$

## 2 VYUŽITÍ VZDUCHU V MĚŘICÍ TECHNICE

Vzduchu, jako zkušebního média, je využíváno v průmyslové praxi velmi často. Jednou z možností využití tohoto média, která bude dále více rozebíraná a je i tématem této práce, je využití při zjišťování míry netěsnosti zkoušených komponent. Jednou z dalších možností je využití vzduchu pro vysoce přesné měření rozměrů dílců. Zde je využito principu změny tlaku vzduchu, který je v převodníku pomocí tlakového senzoru převeden na elektrický signál (Obr. 2-1). Tento signál je následně vyhodnocen a přepočítán na číselný rozměr. [4]



POZICE	POPIS
A	Přívod vzduchu
B	Regulace tlaku vzduchu
C	Ventil
D	Senzor tlaku 1
E	Vzduchová tryska
F	Senzor tlaku 2
G	Ventil
H	Senzor měření

Obr. 2-1 Schéma vzduchového měření [4]

Tohoto principu v měřicí technice využívá například německá firma Stotz Feinmesstechnik GmbH, která je jedním z předních dodavatelů přesné měřicí techniky do automobilového průmyslu jak v Německu, tak po celém světě. Díky dlouholetému vývoji tohoto systému se firmě Stotz podařilo zdokonalit přesnost tohoto měření až na hranici 0,1  $\mu\text{m}$ . [5]



Obr. 2-2 Měřicí sloupec firmy STOTZ [5]

### 3 MÍRA NETĚSNOSTI A NEGATIVNÍ VLIVY NA JEJÍ URČENÍ

#### 3.1 Míra netěsnosti

Úvodem je nutné říci, že absolutní těsnost neexistuje! Těsnost zkoušeného systému je definována jeho mírou netěsnosti. Míru netěsnosti není technicky možné přímo změřit. U kapalin lze obecně říci, že míru netěsnosti je možno definovat změnou objemu za čas. [6]

Míra netěsnosti kapalin je dána vztahem (3.1):

$$Q_L = \frac{\text{změna objemu}}{\text{změna času}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (3.1),$$

kde:  $\Delta V$  [m<sup>3</sup>] - změna objemu,

$\Delta t$  [s] - změna času.

U plynů je nutno brát v potaz to, že jsou plyny stlačitelné, a proto jejich objem závisí také na tlaku.

Pokud je plynem naplněný zkoušený systém určitým způsobem netěsný, definuje se míra netěsnosti pomocí množství uniklého plynu za jednotku času. Velikost úniku plynu lze potom určit dvěma rozdílnými způsoby, a to:

1. Změřením množství vzduchu, které ze zkušebního objemu unikne do okolní atmosféry za časovou jednotku (3.2).

$$Q_L = \frac{\text{okolní tlak} \times \text{množství vzduchu}}{\text{časová jednotka}} \left[ \frac{\text{mbar} \times \text{l}}{\text{s}} \right] \quad (3.2).$$

2. Změřením poklesu tlaku ve zkušebním objemu, který se vyskytne za časovou jednotku (3.3).

$$Q_L = \frac{\text{rozdíl tlaku} \times \text{zkušební objem}}{\text{časová jednotka}} \left[ \frac{\text{mbar} \times \text{l}}{\text{s}} \right] \quad (3.3). [6]$$

Určení míry netěsnosti probíhá na základě fyzikálních zákonů plynů, a to na základě stavové rovnice plynů. Stavová rovnice plynů popisuje vztah mezi jednotlivými stavovými veličinami charakterizující termodynamický systém. Stavová rovnice vznikla na základě



zákonů Boyle-Mariottova a Gay-Lussacova. Pokud budeme brát ideální plyny, tak stavová rovnice ideálního plynu je:

$$p \times V = m \times R \times T \quad (3.4),$$

kde:  $p$  [Pa] - absolutní tlak plynu,

$V$  [mm<sup>3</sup>] - objem plynu,

$m$  [kg] - množství plynu,

$T$  [K] - absolutní teplota,

$R$  [ $\frac{J}{mol \times K}$ ] - molární plynová konstanta. [2]

Pro naše úvahy platí, že celkové množství plynu v měřené soustavě je rovno množství plynu po měření a množství plynu uniklého z měřené soustavy. Platí tedy:

$$m_C = m_M + m_L \quad (3.5),$$

kde:  $m_C$  [kg] - celkové množství plynu v měřené soustavě (před měřením),

$m_M$  [kg] - množství plynu v měřené soustavě po měření,

$m_L$  [kg] - množství uniklého plynu během měření. [6]

Jednotlivá množství plynu z rovnice (3.5) nahradíme stavovou rovnicí (3.4):

$$\frac{p_C \times V_C}{R \times T_C} = \frac{p_M \times V_M}{R \times T_M} + \frac{p_L \times V_L}{R \times T_L} \quad (3.6).$$

Je nutno předpokládat, že se jedná o izotermický děj ( $T = \text{konst.}$ ), plynová konstanta zůstává beze změny ( $R = 8,314$ ) a objem zkoušené soustavy se před a po měření nezměnil ( $V_C = V_M$ ). Za těchto předpokladů se rovnice změní na:

$$V_C(p_C - p_M) = p_L \times V_L \quad (3.7).$$

Po úpravě rovnice (3.7) získáme pro úbytek tlaku za jednotku času rovnici:

$$V_L = \frac{\Delta p \times V_C}{t \times p_L} \quad (3.8),$$

kde:  $V_L$  [m<sup>3</sup>/s] - únik, míra netěsnosti,  
 $\Delta p$  [Pa] - změna tlaku v soustavě v rámci měření,  
 $t$  [s] - čas měření,  
 $p_L$  [Pa] - atmosférický tlak. [3]

Těsnost soustavy, případně míra její netěsnosti, závisí na funkčním účelu měřené součásti. Zkušební objekty jsou v závislosti na dovolené míře netěsnosti zkoušeny na definovanou míru své netěsnosti.

Ve vakuové technice je míra netěsnosti velmi často udávána jednotkou mbar×l/s. Tato míra netěsnosti je dána, když v nádobě o objemu 1 litr za 1 sekundu stoupne nebo poklesne tlak o 1 mbar. Někdy je možné se setkat také s jednotkou cm<sup>3</sup>/s nebo ml/min. [6]

## **3.2 Vlivy působící na určení hodnoty míry netěsnosti**

### **3.2.1 Vliv tlaku**

Výše uvedené rovnice ukazují přímou souvislost změny tlaku a míry netěsnosti. Vliv zkušební tlaku je nutné zohlednit pomocí vlastnosti proudění. U míry netěsnosti, kterou chceme zjistit stávajícími postupy, je nutné považovat proudění plynů unikající přes netěsnosti v soustavě za proudění laminární. [3]

### **3.2.2 Vliv teploty**

Při předcházející rozvaze bylo vždy uvažováno, že během měření míry netěsnosti nedochází k žádným změnám teploty. K takovému ideálnímu stavu však v běžné praxi málo kdy dochází a vliv teploty bývá někdy velmi zásadní. Zkušební plyn se během zahřátí roztahuje a dochází ke změně objemu uvnitř měřené soustavy, čímž dochází i ke změně hodnoty hledané míry netěsnosti. Pro zjištění vlivu teploty je nutno vycházet ze stavové rovnice ideálního plynu (3.4) s úvahou, že soustava je těsná (objem zkušební plynu se nemění), množství zkušební plynu i jeho molární konst. se nemění.

Pak získáme rovnici

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (3.9),$$

- kde:  $p_1$  [Pa] - absolutní tlak v soustavě před měřením,  
 $p_2$  [Pa] - absolutní tlak v soustavě po měření,  
 $T_1$  [K] - absolutní teplota v soustavě před měřením,  
 $T_2$  [K] - absolutní teplota v soustavě po měření. [6]

Po úpravě dostaneme rovnici popisující změnu tlaku v závislosti na teplotě:

$$p_2 = \frac{p_1 \times T_2}{T_1} \quad (3.10).$$

Díky změnám teploty měřené soustavy může dojít k podstatnému zkreslení výsledků hledané míry netěsnosti, dokonce i mnohokrát větší než je její dovolená mez pro danou soustavu. Proto je nutné v maximální možné míře eliminovat možné vlivy teploty, např. klimatizovaného prostředí, kde se měření odehrává. Vliv teploty stoupá se zkušebním tlakem, tzn. s čím vyšším zkušebním tlakem je pracováno, tím je měření kritičtější. [6]

### 3.2.3 Termodynamické jevy

Termodynamické jevy vedou k tomu, že i přes všechny možné způsoby vylepšení za účelem snížení vlivu tepla na měřenou soustavu, vykazuje tato soustava určitou netěsnost, a to i přesto, že je zkoušená soustava co nejvíce těsná. Za tímto efektem stojí právě tepelné změny během plnění.

Plněním zkoušené soustavy zkušebním médiem (nejčastěji vzduch) dochází ke kompresi plynu a tím k nárůstu teploty. Nejedná se o čistou izotermickou změnu stavu, protože během plnění proudí do soustavy stále nový plyn a dochází k jeho promíchávání. Navýšením teploty dochází k rozdílu teplot mezi zkušebním vzduchem a zkušební soustavou. Až v následujících fázích dochází k vyrovnání teplot, a proto je velmi důležité zvolit dostatečně dlouhou dobu vyrovnání, aby došlo k eliminaci těchto jevů, kdy teplota zkušebního vzduchu klesá, teplota soustavy narůstá a tím dochází k poklesu tlaku. [6]

## **4 URČENÍ MÍRY NETĚSNOSTI**

### **4.1 Normy pro zkoušení míry netěsnosti**

Zkoušky pro zjišťování míry netěsnosti se řídí několika EN normami, a to podle dané zkušební metody. Základními EN normami ve vztahu ke zkouškám těsnosti jsou:

EN 1779 - Kritéria pro volbu metod a postupů

EN 1518 - Charakterizace detektorů netěsnosti na principu hmotnostních spektrometrů

EN 1593 - Bublínková metoda

EN 13184 - Metoda změny tlaku

EN 13185 - Metoda zkušebního plynu

EN 13192 - Kalibrace referenčních netěsností pro plyny

EN 13625 - Směrnice k volbě přístrojů pro měření netěsnosti plynem

Hlavní úlohou při hledání netěsností je lokalizace a měření velikosti netěsnosti. V průběhu zkoušky je doporučeno zachovat stejné tlakové podmínky, jako při běžném používání testovaného objektu, stejně tak směr toku značkovacího plynu by měl proudit stejným směrem, který je obvyklý při skutečném využití testovaného produktu. [8]

#### **4.1.1 Lokalizace netěsnosti**

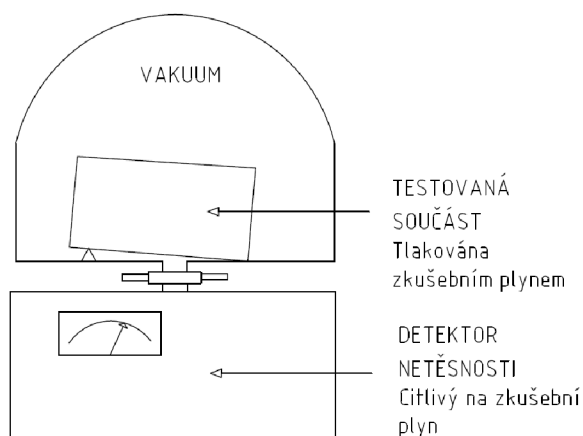
Lokalizace netěsností slouží k hledání přesné polohy jednotlivých netěsností. Pomocí metod popsanych dále je možné odhalit všechny měřitelné netěsnosti a poté je zcela odstranit, testovaný produkt přepracovat, nebo případně nově navrhnout.

Používanými metodami je čichací a postřikovací test. Tyto dva testy budou podrobně rozebrány v následující kapitole. [15]

#### **4.1.2 Měření míry netěsnosti**

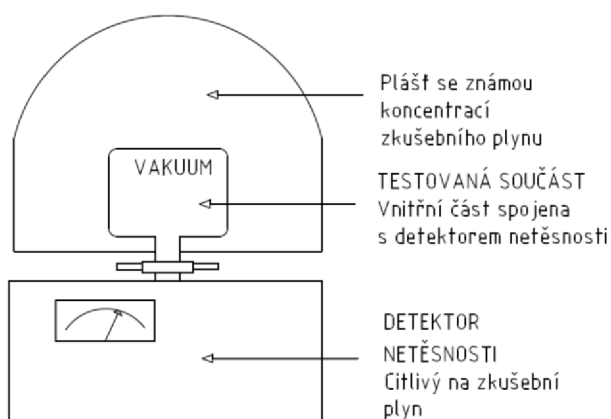
Měření míry netěsnosti slouží k měření celkového nebo částečného úniku zkušebního plynu z měřeného systému, případně z jeho části. Nejspolehlivějším způsobem testování je zjištění úniku nejprve celkového a následně zaměření jednotlivých úniků, které byly lokalizovány pomocí výše zmíněných metod. Metody zjištění lokalizace se nehodí k měření míry netěsnosti, protože výsledky mohou být nespolehlivé a neekonomické, vzhledem k cenám a množství spotřebovaného zkušebního plynu.

Dva základní postupy měření míry netěsnosti se v praxi nazývají metoda zevnitř-ven a metoda zvenku-dovnitř. Při použití metody zevnitř-ven se testovaný produkt naplní značkovacím plynem a upevní se do testovací komory. Z testovací komory se vyčerpá vzduch. Následně je jakýkoli únik značkovacího plynu zachycen uvnitř testovací komory. Obsah komory, který představuje celkový únik, je analyzován detektorem.



Obr. 4-1 Metoda měření míry netěsnosti metodou zevnitř-ven [15]

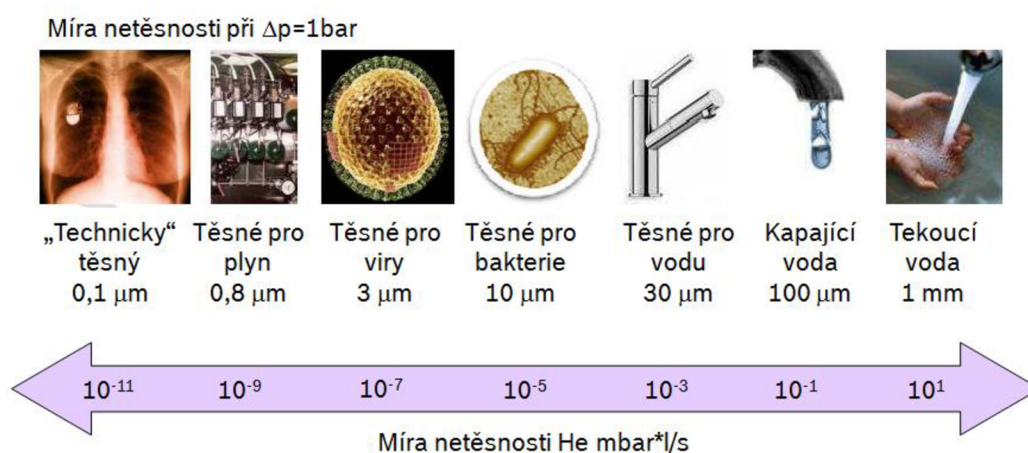
U metody zvenku-dovnitř je princip podobný. Vzduch v testovaném produktu je zcela vyčerpán a umístěn do testovací komory, která je naplněna daným množstvím značkovacího plynu. Při případné netěsnosti produktu proniká zkušební plyn netěsnostmi do testovaného produktu. [15]



Obr. 4-2 Metoda měření míry netěsnosti metodou zvenku-dovnitř [15]

### 4.1.3 Dovolené míry netěsnosti

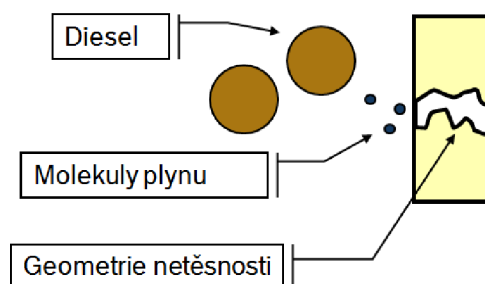
Obecně lze konstatovat, že volba správné metody se odvozuje od požadovaného limitu netěsnosti, provozních podmínek a rozpočtu na provedení testu. Na následujícím obrázku (Obr. 4-1) lze vidět míry netěsnosti v běžných podmínkách. [6]



Obr. 4-1 Příklad netěsnosti v praxi [6]

### 4.2 Zkoušení míry netěsnosti ve firmě Bosch Diesel, s.r.o.

Firma Bosch Diesel s.r.o. v Jihlavě vyrábí komponenty systému „Common rail“ pro automobilový průmysl, přičemž její výrobky jsou určeny pro dieselové motory různých produktových řad. Tyto výrobky jsou zkoušeny na tzv. diesel těsnost. Při určení míry netěsnosti produktu je daný produkt podroben předem definované zkoušce, s definovaným zkušebním médiem o daném tlaku a je definovaná i přípustná míra netěsnosti pro tento produkt. Pro každý vyrobený produkt je tato dovolená míra netěsnosti, pro danou zkoušku, empiricky prokázána jako dostatečně bezpečná, aby tak nemohlo dojít k omezení, popř. ohrožení funkčnosti jednotlivých vyráběných produktů firmou Bosch Diesel. Mezi běžně používané zkušební plyny patří stlačený vzduch, hélium, formovací plyn (5%  $\text{H}_2$  a 95%  $\text{N}_2$ ) a jiné. Jako měřicí medium je nejčastěji používán již zmiňovaný stlačený vzduch, a to vzhledem ke své levné pořizovací ceně, snadnému zpracování a v neposlední řadě vzhledem k ekologické nezávadnosti. Na následujícím obrázku lze vidět zjednodušený princip zkoušek s předem definovanou a povolenou mírou netěsnosti. Tato malá netěsnost v měřeném produktu může propustit pouze malé množství částic zkušebních plynů, ale nepropustí již částice zkušební kapaliny, popř. kapaliny používané v běžném provozu. [6]



Obr. 4-2 Povolená „Diesel“ těsnost[6]

Zde lze vidět předepsané povolené míry netěsnosti pro vybrané produkty vyráběné firmou Bosch diesel, s.r.o. v Jihlavě. Dovolena míra netěsnosti:

- Čerpadlo CP3 -  $5 \times 10^{-4}$  mbar $\times$ l/s
- Čerpadlo CP4 -  $2,5 \times 10^{-2}$  mbar $\times$ l/s
- Čerpadlo CPN5 -  $2,5 \times 10^{-2}$  mbar $\times$ l/s [6]

## 5 METODY DETEKCE MÍRY NETĚSNOSTI

### 5.1 Druhy zkoušek těsnosti

Jednotlivé metody detekce netěsnosti volíme s ohledem na tři základní aspekty. Prvním je limit těsnosti ( $\text{mbar} \times \text{l/s}$ ), dále rychlost (nebo také doba jednotlivého cyklu měření) a posledním finanční náročnost. Dále rozlišujeme, zda je prioritní měření kvantifikace úniku nebo lokalizace úniku. [6]

Tab. 5-1 Odhalitelnost průniku částic [7]

Zkušební metody	Únik v $\text{mbar} \times \text{l/s}$											
	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$
Metoda diferenčního tlaku	■	■	■									
Helium - atmosféra	■	■	■	■	■	■	■					
Vodík	■	■	■	■	■	■	■					
Helium - vakuové komory	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ultrazvuková detekce plynů – bublinková metoda	■	■	■	■	■	■						

#### 5.1.1 Akustická metoda

Akustická metoda je metoda, kterou se měří netěsnost soustavy za pomoci zvuku nebo ultrazvuku. Využívá se (ultra)zvukové energie, která vzniká při úniku rozpínajícího se plynu v místě netěsnosti. Netěsnost se detekuje přijímačem, ve kterém dochází k frekvenčnímu přenosu do slyšitelného rozsahu a následně k zobrazení na displeji měřicího přístroje. Omezením u této metody je hlučné prostředí a měření netěsností menších než  $10^{-3} \text{ mbar} \times \text{l/s}$ . [6]



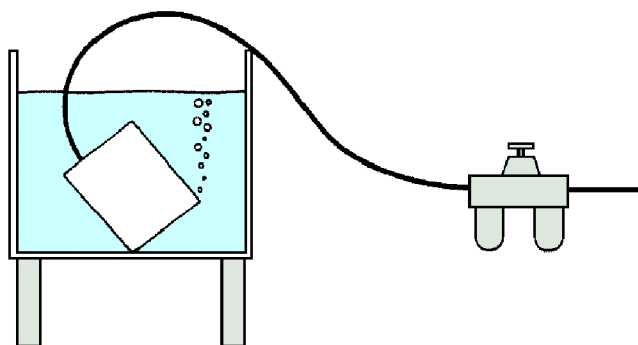
Obr. 5-1 Měření akustickou metodou [6]



### 5.1.2 Bublínkový test

Tento velmi jednoduchý test se využívá k měření netěsnosti v prostředí kapaliny. Měřená součást je natlakována vzduchem pod hladinou vodní lázně a operátor sleduje únik vzduchu v podobě bublinek. Pomocí této metody je možné případnou netěsnost i lokalizovat. Hlavní předností této metody je jednoduchost a levný provoz.

Mezi nevýhody patří závislost na schopnostech obsluhující osoby a subjektivní posouzení reziduálního úniku a úniku z netěsnosti, časová náročnost a nutnost vysušení produktu od provozní kapaliny po testování. Praktická dosažitelná citlivost je  $5 \times 10^{-3}$  mbar $\times$ l/s. [7]



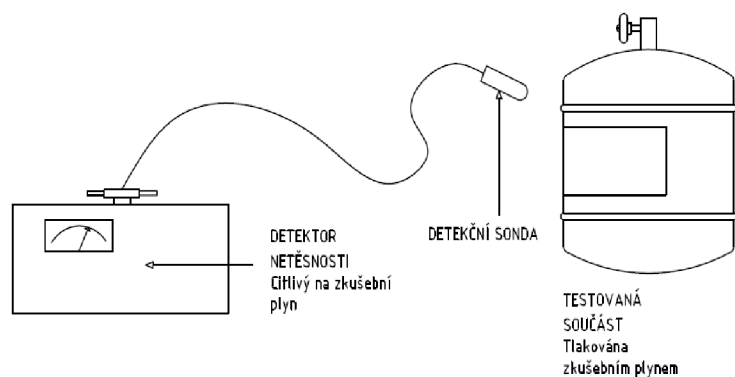
Obr. 5-2 Měření bublinkovou metodou [8]

### 5.1.3 Detekce za pomoci značkovacího plynu

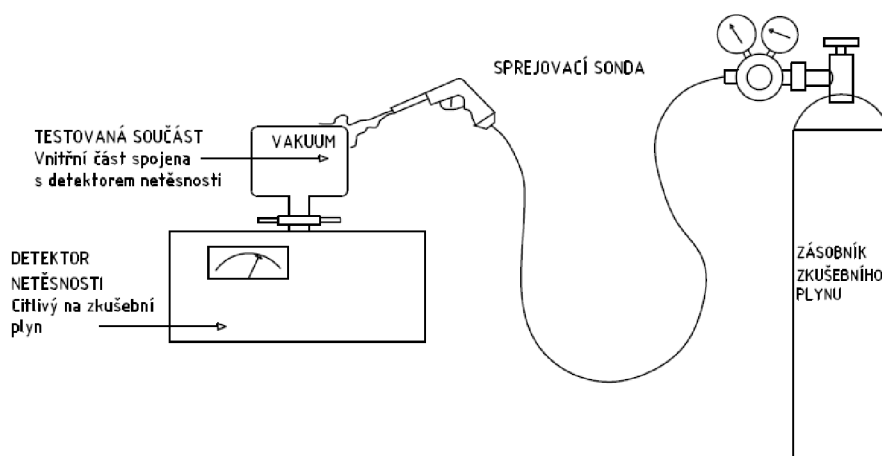
Metoda čichacího a postřikovacího testu umožňuje lokalizaci i kvantifikaci netěsnosti. V případě čichacího testu je testovaný produkt natlakován zkušebním plynem (formovací plyn - 5% H<sub>2</sub>/95% N<sub>2</sub>, 4.6 He, případně He/vzduch). Pravděpodobné netěsnosti jsou detekovány (očichány) za pomoci sondy detektoru. Detektor se postupně přepíná a měří jednotlivá místa. Takto je možné lokalizovat netěsnosti na jednotlivých místech. [8]

V případě postřikovacího testu se z testovaného produktu vysaje vzduch (vytvoří se vakuum) a produkt je postupně postřikován zvenku zkušebním plynem. V případě netěsností plyn pronikne do testovaného produktu a je zachycen detektorem. [15]

Výhodou je velká citlivost detektoru a možnost testování velkých objemů. Nevýhodou může být závislost na operátorovi a jeho schopnostech. Tato metoda je nákladná, vzhledem k cenám plynů. [6]



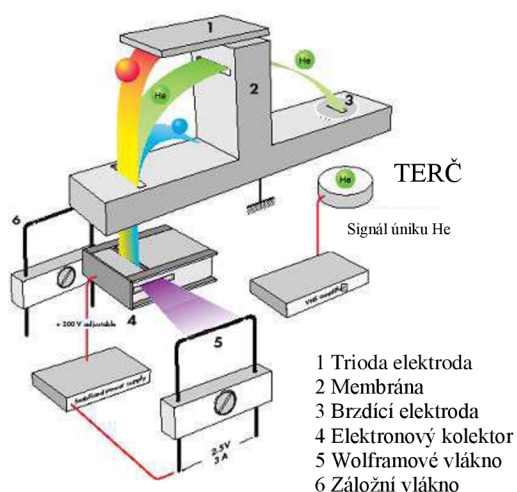
Obr. 5-3 Měření značkovacím plynem - číhací test [15]



Obr. 5-4 Měření značkovacím plynem - postřikovací test [15]

#### 5.1.4 Heliová vakuová zkouška

Testovaný produkt je vložen do zkušební komory, z které je následně odsán vzduch na definovanou hladinu vakua. Posléze je odsán i sám produkt (odstranění zbytkového množství He obsaženého ve vzduchu) a ihned poté je naplněn héliem. Pokud je produkt netěsný, uniká plyn do prostoru zkušební komory, kde je pomocí vakuové pumpy nasáván do hromadného spektrometru. Pomocí něj se měří únik částic hélia ze zkoušeného produktu do zkušební komory. Detekční limit této zkoušky se v laboratorních podmínkách může pohybovat až okolo  $10^{-11}$  mbar×l/s. V běžné praxi takto malou netěsnost nelze odhalit, detekční limit je přibližně  $10^{-8}$  mbar×l/s. Výhodou této zkoušky je nezávislost na obsluze a vlivu okolních podmínek (teplot). Nevýhodou je nutnost pravidelné kalibrace a s tím spojené náklady. [7]



Obr. 5-5 Hmotnostní spektrometr [8]

## 5.2 Druhy zkoušek těsnosti prováděných vzduchem

Tyto zkoušky se hodí k měření součástí v běžné sériové produkci. Měřená součást je naplněna stlačeným vzduchem na předem definovaný tlak a následně se měří pokles tlaku uvnitř této součásti. Pokud dojde k poklesu tlaku směrem k tlaku atmosférickému a zároveň pod stanovenou mez, je součást vyhodnocena jako vadná.

Hlavní výhodou této metody je přesné měření reálného úniku, rychlost měření a možnost plné automatizace na montážní lince, což znamená vyloučení vlivu operátora. Nevýhodou je velká závislost na teplotě. [9]

### 5.2.1 Metoda absolutního měření poklesu tlaku

Jestliže je měřená součást těsná, nedochází k poklesu tlaku a manometr neukazuje žádnou výchylku, ale stále stejný tlak v součásti. Pokud je naopak součást poškozená, tlak klesá a manometr ukazuje snížení tlaku.

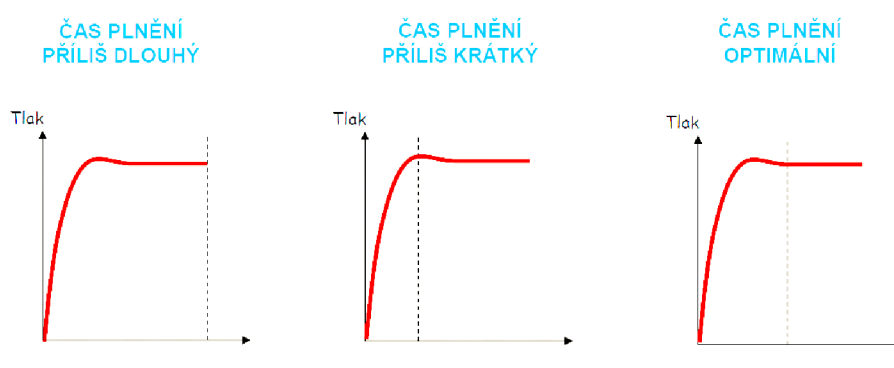
Během krátké doby měření je takto možné vyhodnocovat pouze větší poklesy tlaku, to znamená větší netěsnosti. Vyhodnocování menších netěsností (úniků) by trvalo neúměrně dlouhou dobu nebo by bylo zcela nemožné. Při menších poklesech se ručička manometru téměř nepohne. [9]

### 5.2.2 Metoda diferenčního měření poklesu tlaku

Princip metody měření spočívá v diferenčním měření malé změny tlaku mezi dvěma obvody, testovanou součástí a referenčním obvodem, poté co byly naplněny na stejný tlak.

Testovaný produkt se připojí k měřicímu přístroji, poté je naplněn stlačeným vzduchem na specifikovaný tlak a tester spustí měřicí cyklus. Měřicí cyklus můžeme rozdělit na čtyři následující části (kroky):

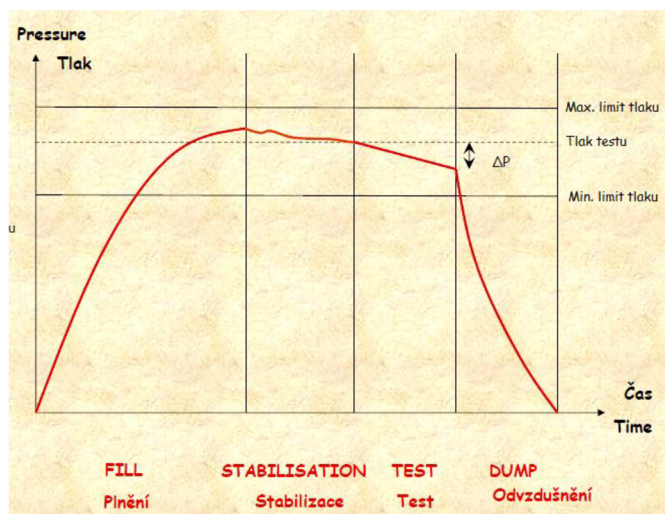
- **Plnění (Fill)** - objem měřené součásti plníme vzduchem na předepsaný tlak.



Obr. 5-6 Schéma doby plnění [9]

- **Stabilizace (Stabilisation)** - proces zklidnění, testovaný oběh je odpojen od zásoby vzduchu.
- **Měření součásti (Test)** - počítačem kontrolovaný měřicí okruh je nastaven na vysokou rozlišitelnost a porovnává signál doručený od tlakového senzoru s počátečním signálem. K získávání výsledků bez rušivých vlivů jsou používány matematické metody. Rozdíly signálu jsou zobrazeny na displeji jako tlaková změna.
- **Odfuk (Dump)** - po změření dojde k odfuku vzduchu ze systému.

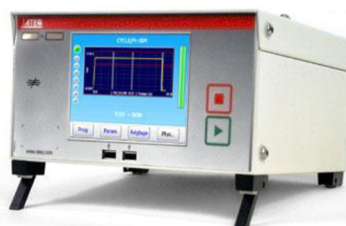
Tímto způsobem měření je možné zaznamenat velice malé poklesy tlaku. [9]



Obr. 5-7 Průběh tlaku při měření metodou diferenčního poklesu tlaku [9]

## 6 MĚŘICÍ PŘÍSTROJ PRO ZJIŠTĚNÍ MÍRY NETĚSNOSTI

Portfolio firem nabízející moderní měřicí přístroje využívající vzduchu, jakožto zkušební média, je na trhu velmi mnoho. Z této řady nelze opomenout firmy jako je ATEQ, Inficon, Bayer, Tetratex, CETA nebo Dr. Wiesner. V laboratoři technického oddělení, zabývajícího se optimalizací a vývojem procesů se nachází zařízení firmy ATEQ, které bude pro účely projektu využito. Jedná se o přístroj ATEQ F5200, jež je vidět na obrázku (Obr. 6-1).



Obr. 6-1 Měřicí přístroj ATEQ F5200 [10]

ATEQ F5200 je malý a kompaktní přístroj pro měření netěsností, který je v současnosti jedním z nejvšestrannějších zařízení vyskytujících se na trhu se zkušebními přístroji. Výhody tohoto měřicího zařízení spočívají v jeho jednoduchosti, nastavení, údržbě, servisu a především použití.

Rozhraní dotykové obrazovky u modelu F5200 umožňuje jednoduchou obsluhu i s malými zkušenostmi s testováním úniku. Uvnitř obsahuje nejnovější techniku a technologii pro měření a testování netěsností. [10]

### 6.1 Hlavní parametry

- Diferenční měření poklesu tlaku.
- Široká škála měření poklesu tlaku  $\Delta P$  s rozsahy 50 Pa, 500 Pa nebo 5000 Pa (přístroj firmy Bosch Diesel, s.r.o. pracuje s rozsahem 500 Pa).
- 32 programů, 2 jazyky (angličtina + jeden jiný).
- Možnost manuálního ověření kalibrovanou netěsností se vstupem z čelního panelu.
- Komunikační rozhraní - tiskárna, USB port pro přenos dat (parametry, výsledky), čtečka čárových kódů.
- Aplikace - automobilový průmysl, letectví, obrana, domácí spotřebiče. [10]

### 6.2 Technické parametry

- Váha 4 kg, rozměry 250×136×367 mm.
- Dotyková obrazovka s jednoduchým a intuitivním menu.
- Elektrické napájení 90-260 V AC / 1,6 A.
- Požaduje se čistý a suchý vzduch.
- Provozní teplota +0°C až +45°C, skladovací teplota 0°C až +60°C. [10]

### 6.3 Všeobecné možnosti využití přístrojů firmy ATEQ

Rozsah testování můžeme rozdělit na 6 odlišných technologií. Každá technologie vyhovuje více či méně konkrétní aplikaci.

Kromě metody měření diferenčního tlaku a metody měření poklesu absolutního tlaku, které jsou popsány v kapitole 5, je možné přístroj ATEQ využít ještě následovně:

1. Nepřetržitý tok, který je často považován za konkurenta technologie hmotnostního průtoku (Mass Flow), závisí na diferenciálním snímači tlaku a velmi přesném laminárním proudění trubici pro měření míry úniku. Metoda zajišťuje, že únik toku v daném čase je velmi stabilní. Tato technologie se dokonale hodí pro plynárenství. Zatímco přístroj měří a ukazuje na displeji hodnotu úniku, operátor může utahovat součást (ventil), dokud nedosáhne přijatelné míry úniku. Maximální rozlišení je  $0,1 \text{ cm}^3 \times \text{atm/h}$ .
2. Laminární proudění je určeno pro velké úniky. Tok probíhá mezi tlakovým vedením a otvorem v součásti. Přístroj je vybaven prvkem pro laminární proudění, přes který je připojen diferenciální snímač tlaku. Každý tok vytváří tlakový rozdíl mezi vstupem a výstupem z prvku s laminárním prouděním a tento rozdíl se měří tlakovým snímačem.
3. Technologie hmotnostního průtoku převede množství vzduchu, které prochází přes měřicí prvek, na hodnotu netěsnosti. Tato technologie je schopna měřit velké netěsnosti a to přímo na montážní lince. Nepoužívají se topné prvky, čímž se snižuje citlivost na kontaminaci.
4. Od předešlých metod se u metody IONIQ nevyužívá k měření úniku vzduch, ale používá se elektrického proudu. Pokud existuje v měřené součásti netěsnost, začnou

se ionty pohybovat směrem k ostrému konci měřícího hrotu s napětím. Touto metodou není možné kvantifikovat míru úniku z hlediska ml/min, ale je to nejrychlejší metoda k měření úniku, která kdy byla vynalezena. Doba cyklu dosáhla hodnoty 7/10 sekundy. Přesnost a rozsah měření závisí na velikosti otvoru a na materiálu součásti. [11]



## 7 DIESELOVÉ ČERPADLO CPN5 A TĚSNÍCÍ KOMPONENTY

### 7.1 Rozdělení čerpadel CPN5

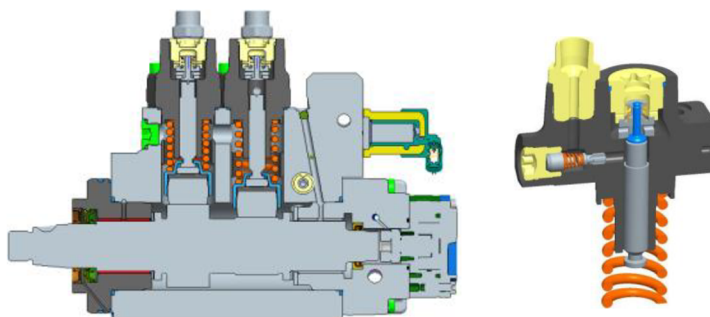
Vysokotlaké diesellové čerpadlo CPN5 je řadové pístové čerpadlo, které je určeno k využití u těžkých užitkových vozidel, případně u mimosilničních vozidel (např. lodě, stavební a zemědělské stroje). Od svých předchůdců se odlišuje tlakem, který je nižší a pohybuje se v rozmezí 900 až 2500 barů, a to podle typu čerpadla. Čerpadlo se dělí do 4 generací (rodin), jejichž značení se liší podle vyvářených tlaků, který do systému common rail dodávají. Základní rozlišení je následující:

#### CPN5 12/2

Počet válců čerpadla

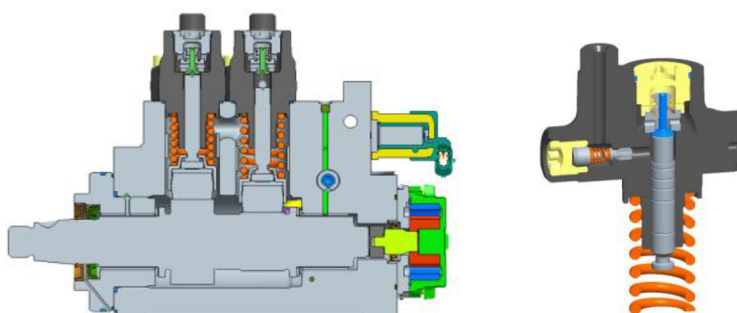
Velikost tlaku dodávaného do systému common rail 12 => 1 200 bar [12]

- CPN5-9/2 - tlak vstřikovacího systému je 900 bar, životnost čerpadla 1 200 000 km, množství dodávaného paliva do tlakového zásobníku (rail) je 630 l/h, hlavní zákazník je Daimler.



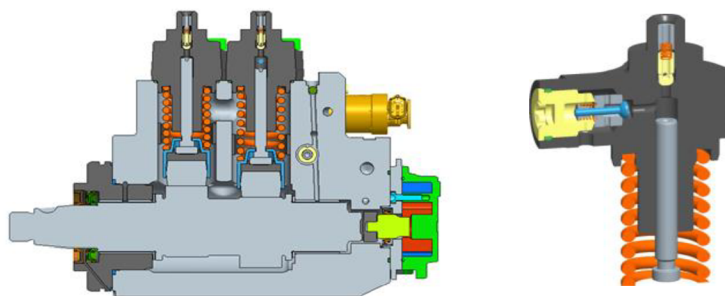
Obr. 7-1 Řez čerpadlem CPN5-9/2 a jeho vysokotlaký element [12]

- CPN5-12/2 - tlak vstřikovacího systému je 1200 bar, životnost čerpadla 1 200 000 km, množství dodávaného paliva do tlakového zásobníku (rail) je 645 l/h, hlavní zákazník je Daimler.



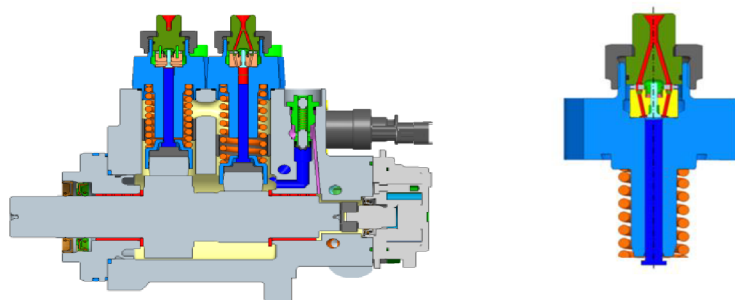
Obr. 7-2 Řez čerpadlem CPN5-12/2 a jeho vysokotlaký element [12]

- CPN5-22/2 - tlak vstřikovacího systému je 2200 bar, životnost čerpadla 1 600 000 km, množství dodávaného paliva do tlakového zásobníku (rail) je 280 l/h, první zákazník byl Navistar,



Obr. 7-3 Řez čerpadlem CPN5-22/2 a jeho vysokotlaký element [12]

- CPN5-25/2 - tlak vstřikovacího systému je 2500 bar, životnost čerpadla 1 600 000 km, množství dodávaného paliva do tlakového zásobníku (rail) je 220 l/h, hlavní zákazník je MAN. [12]



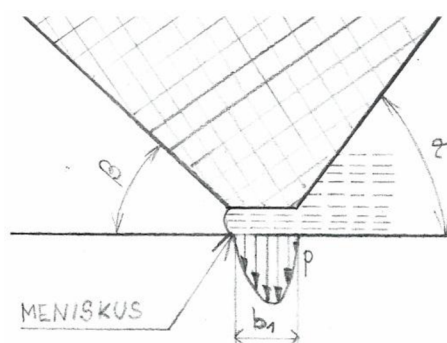
Obr. 7-4 Řez čerpadlem CPN5-25/2 a jeho vysokotlaký element [12]

## 7.2 Hřídelové těsnicí kroužky (HTK)

Hřídelové těsnicí kroužky jsou dotykové těsnicí prvky, které slouží k utěsnění rotujících hřídelí a ostatních strojních součástí. Jsou schopny zabezpečit těsné oddělení mezi dvěma různými prostředími stejného nebo různého charakteru s malým tlakovým spádem.

HTK jsou většinou tvořeny výstužným kovovým kroužkem, částí z pryže a tažnou pružinou. Kovový kroužek slouží k správné montáži a spolehlivému upevnění v úložné díře. K výstužnému kovovému kroužku je přidělena membrána, která přechází v těsnicí břit. Tato membrána zlepšuje vlastnosti těsnění vzhledem k nesouososti a obvodovému házení hřídele.

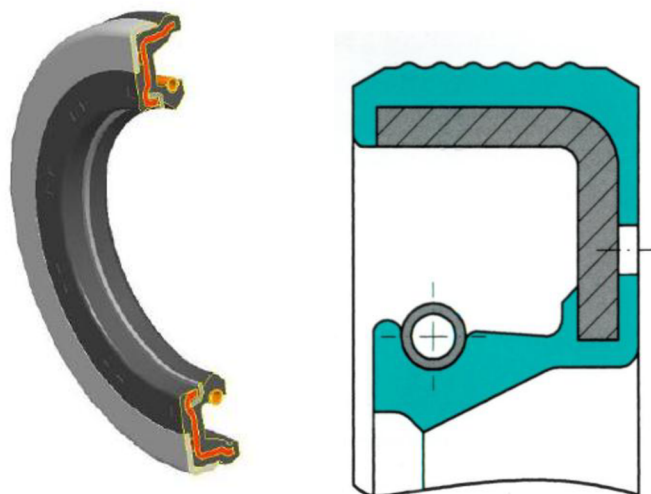
Těsnicí břit, který má trojúhelníkový průřez, je tvořen náběhovou plochou z vnitřní těsnicí strany proti ose hřídele pod úhlem  $\alpha$  a z vnější strany plochou, která přiléhá na hřídel pod úhlem  $\beta$ .



Obr. 7-5 Náběhové plochy těsnicího břitu [13]

Vnější pryžový plášť zabezpečuje statickou těsnost. V prašném prostředí slouží k ochraně prachovka, která se nachází na spodní ploše těsnění.

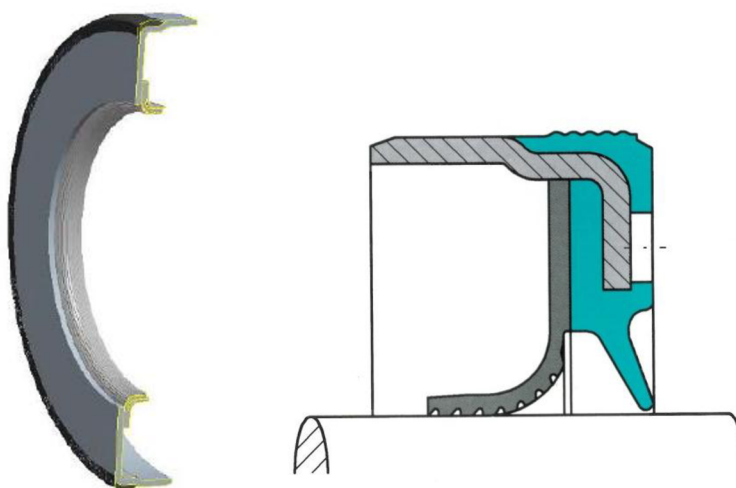
HTK zajišťuje statickou těsnost v uložení. Je zajištěna přesahem vnějšího průměru HTK proti průměru úložné díry na hřídeli. Dynamická těsnost je zajištěna na ploše kontaktu těsnicího břitu a hřídele. Mezi těsnicími plochami je nutný mazací film, aby nedocházelo k opotřebení těsnění a zkrácení životnosti HTK. [13]



Obr. 7-6 Hřidelový těsnicí kroužek [13]

### 7.3 Těsnicí kroužky s PTFE břity

PTFE hřidelové těsnicí kroužky jsou vyráběny z optimalizovaných materiálů a to za účelem minimalizace tření mezi těsněním a rotující hřídelí. Na rozdíl od HTK nemají PTFE břity uvnitř pružinku, ani výstužný kovový kroužek. Těsnost rotující hřídele zajišťuje šroubovice v části těsnění přilehající k hřídeli. Šroubovice je orientována proti směru otáčení hřídele a to tak, aby kapalinu směřovala zpět do vnitřní části čerpadla. Jejich nevýhodou je netěsnost ve statické poloze čerpadla. [14]



Obr. 7-7 PTFE břity [14]

## 8 ROZBOR SOUČASNÉ PROBLEMATIKY MĚŘENÍ MÍRY NETĚSNOSTI V OBLASTI CPN5

Vysokotlaká čerpadla CPN5 jsou ve firmě Bosch diesel s.r.o. Jihlava vyráběny na jedné z nejmodernějších linek ve své divizi. Montážní linka je rozdělena na suchou a mokrou část, podle toho, zdali vyráběný produkt přijde do styku se zkušební kapalinou, či nikoliv. Na obou částech montáže je vykonávána zkouška těsnosti. Na suché části se jedná o héliovou vakuovou zkoušku, kde je při zkušebních tlacích 1,5 a 6 barů zkoušen jak vnitřní okruh (vnitřní část vysokotlakého čerpadla), tak i okruh vnější (zastoupen pouze vnějším hřídelovým těsněním). Pokud se během zkoušky pohybuje míra netěsnosti do předepsané tolerance, a to do  $2,5 \times 10^{-2}$  mbar $\times$ l/s, je testované čerpadlo vyhodnoceno jako v pořádku a odesláno na mokrou část. Na mokré části projde čerpadlo několika dalšími montážními operacemi, přičemž jednou z nich je i zkouška funkce vysokotlakého čerpadla. Zde je důležitým prvkem pro zkoušku těsnosti to, že je čerpadlo zalito zkušební kapalinou, která během zkoušky supluje palivo.

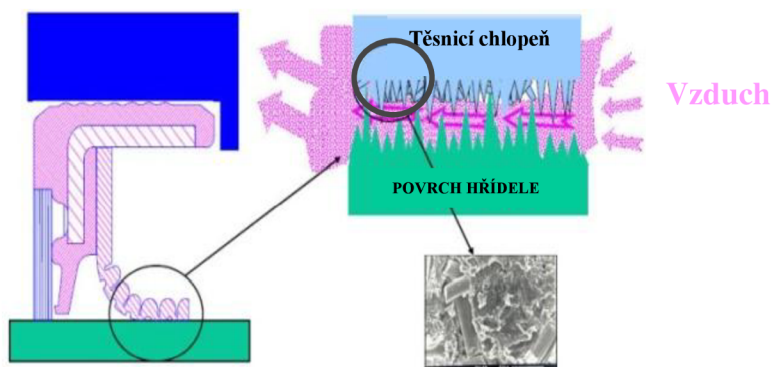
Během samotné zkoušky funkčnosti zkušební kapalina vyčistí vnitřní prostory vysokotlakého čerpadla od zbytků montážních olejů a maziv, které mohou případnou netěsnost mezi těsníci komponenty dočasně utěsnit a během zkoušky těsnosti na suché části (poslední operace suché části) mohou být tato čerpadla označena jako „funkčně těsná“. Z tohoto důvodů je na mokré části další zkouška těsnosti, která je prováděna bublinkovou metodou, pomocí níž operátoři po jim předepsanou dobu detekují unikající bublinky značící potenciální netěsnost zkoušeného vysokotlakého čerpadla. Pro tuto metodu je dán zkušební předpis s tím, že po definovanou dobu nesmí být pozorovány unikající bublinky vzduchu. Tato metoda je bohužel velmi subjektivní a záleží nejen na zkušenostech operátora, ale i také na jeho momentálním rozpoložení (únava, stress, náročná práce na oči, atd.).

Z těchto, ale i čistě úsporných důvodů, bylo rozhodnuto vytvořit projekt zabývající se možností nahradit tento způsob testování plně funkční automatickou stanicí, která bude detekovat možnou míru netěsnosti testovaných vysokotlakých čerpadel. Dílčím cílem projektu bylo také otestovat nový typ těsnícího hřídelového kroužku, jehož využití si vyžádal jeden z významných zákazníků firmy.

## 9 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Pro projekt byl sestaven realizační tým skládající se ze specialistů technického oddělení zabývajících se optimalizací a vývojem procesů, pracovníků výrobního oddělení vysokotlakého čerpadla CPN5 a pracovníky vývoje tohoto čerpadla. Pro ověření možnosti využití stlačeného vzduchu v této oblasti bylo rozhodnuto využít široké škály možností měřicího přístroje ATEQ F5200, který je ve firmě k dispozici. Pro dílčí úkol byl využit měřicí přístroj ATEQ D520, který firma pro své potřeby zakoupila.

Prvním cílem (dílečím) bylo vyvinout metodiku zkoušení nového těsnícího hřídelového kroužku, který si přál aplikovat do svých čerpadel zákazník. Jednalo se o náhradu standardního hřídelového těsnění za hřídelové těsnění s PTFE břit, se systémem HELIX, kde je šroubovice těsnícího břitu orientována tak, aby byla v opačném směru, než je směr otáčení vysokotlakové čerpadla, tzn., aby případně uniklou kapalinu směřovala zpět. Vývoj na podobné platformě se uskutečnil minulý rok, kdy byl tento typ hřídelového těsnícího kroužku aplikován do čerpadel CP3. Vzhledem k tomu, že tento typ těsnících kroužků neměl dostatečný kontakt se samotnou hřídelí (u běžných těsnění vyvinutý pružinou), jak naznačuje obrázek (Obr. 9-1), bylo nutné vyvinout úplně novou metodu, která by byla schopna tyto těsnící elementy v statickém stavu odzkoušet.

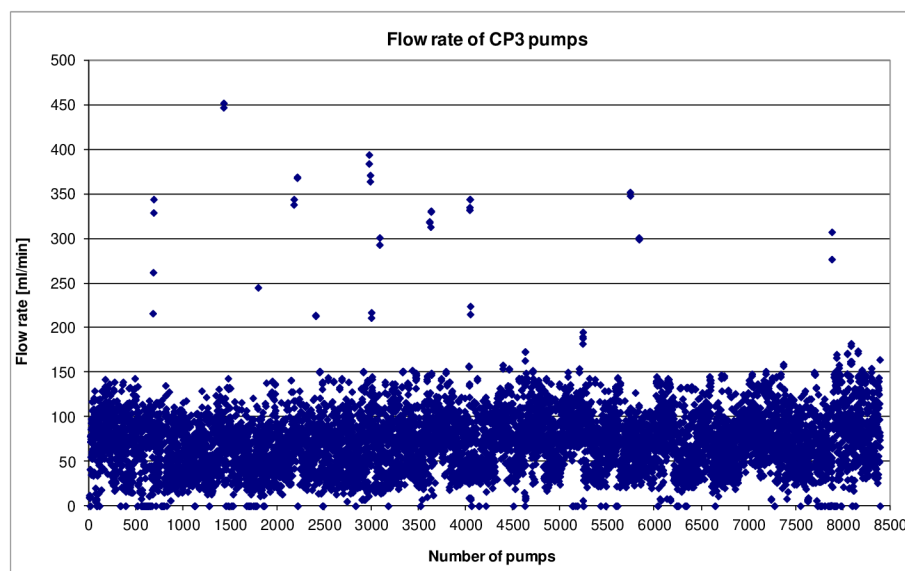


Obr. 9-1 PTFE břit [14]

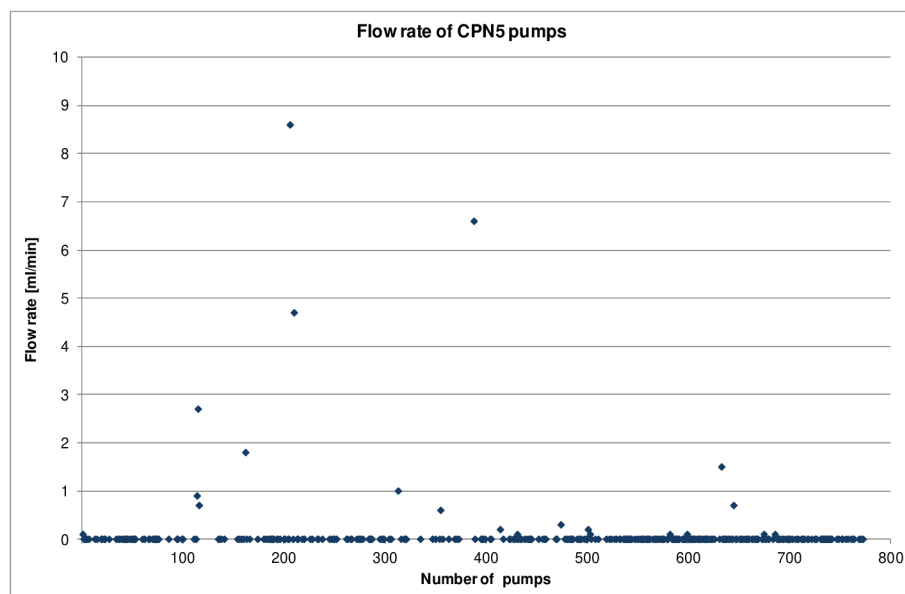
U typu čerpadel CP3 se jako nejvhodnější prokázala metoda průtoku vzduchu, která při korelaci s dynamickými zkouškami prokázala velkou spolehlivost objevit potenciální netěsnost, popř. poškození těsnícího kroužku. Jelikož se jednalo o téměř totožný těsnící kroužek, byla tato metoda testována i u vysokotlakých čerpadel CPN5. Protože tyto těsnící kroužky vykazují určitou míru netěsnosti již v základním statickém stavu (kvůli již popsanému systému HELIX a jeho šroubovici), bylo nutné současně změnit zkušební

předpis pro všechny vysokotlaká čerpadla, do kterých budou tyto těsnící kroužky implementovány. Vakuová zkouška, prováděna pomocí hélia, zůstává u vysokotlakých čerpadel s těmito těsnícími kroužky pouze pro vnitřní okruh, vnější okruh je nutno zkoušet mimo tuto stanici.

První výsledky na čerpadlech CPN5 s těmito kroužky naznačily jiný trend, než byl pozorován u čerpadel CP3 s obdobnými kroužky. Tyto výsledky jsou zobrazeny na Obr. 9-2 a Obr. 9-3.



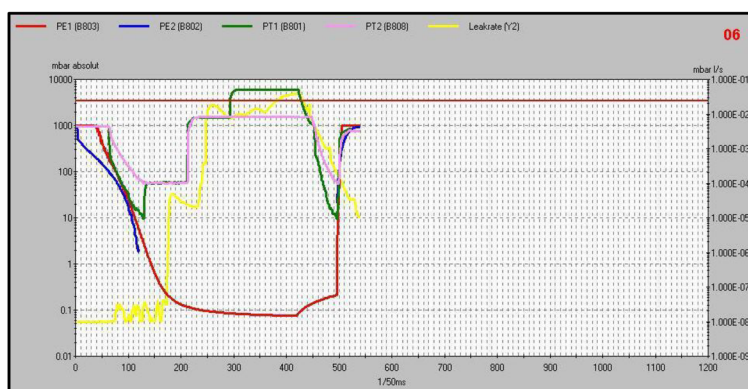
Obr. 9-2 Výsledky průtoku vzduchu u čerpadla CP3



Obr. 9-3 Výsledky průtoku vzduchu u čerpadla CPN5

Z grafů je zřetelně vidět, že průtok vzduchu za stejných zkušebních podmínek u vysokotlakých pump CP3 je podstatně vyšší, oproti průtoku u pump CPN5. Po ověření u dodavatele kroužků bylo zjištěno, že těsnící kroužky mají určité odlišnosti, které patrně zapříčiňují tyto odchylky. Jako hlavní odlišnosti byly identifikovány: nižší počet vláken (z původních 25% na 15%), větší délka šroubovice, chybějící STOP bod (zajištění těsnost kapaliny během statického stavu) oproti systému u CP3, atd.

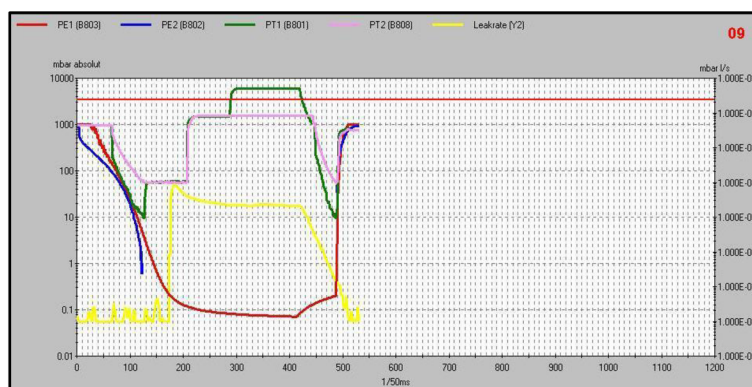
Z těchto výsledků vyplynulo, že dodávané těsnící kroužky vykazují mnohem vyšší těsnost, než se předpokládalo. Z tohoto důvodu byly čerpadla s těmito těsnícími elementy podrobeny héliové vakuové zkoušce, jejímž cílem bylo zjistit reálnou míru netěsnosti soustavy. Příklad jednoho měření lze vidět na Obr. 9-4.



**Obr. 9-4 Výsledky héliové vakuové zkoušky se zapojeným vnějším okruhem**

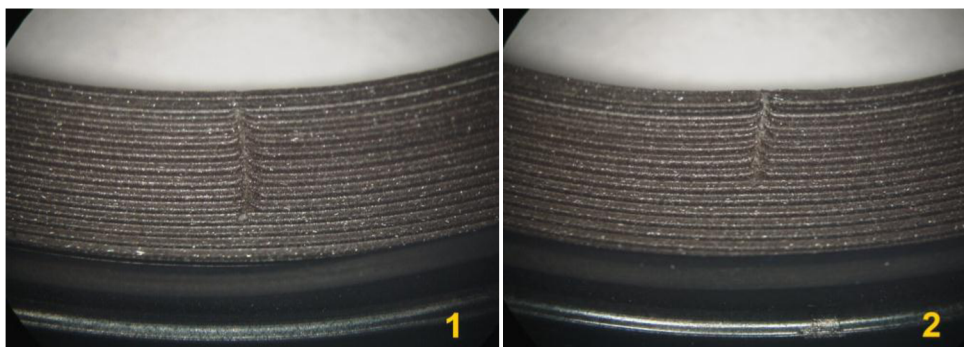
Na Obr. 9-4 znázorňuje modrá a červená čára průběh tlaku ve zkušební komoře. Zelená barva reprezentuje tlak vnitřního okruhu, růžová barva zachycuje průběh tlaku ve vnějším okruhu. Žlutá barva vyobrazuje míru netěsnosti soustavy během zkoušky. Z tohoto grafu lze jednoznačně vidět, že max. míra netěsnosti čerpadla ( $3,716 \times 10^{-2}$  mbar $\times$ l/s) se zapojeným vnějším okruhem převyšuje povolenou mez míry netěsnosti ( $2,5 \times 10^{-2}$  mbar $\times$ l/s). Pro ověření byl proveden obdobný test s nezapojeným vnějším okruhem.





Obr. 9-5 Výsledky héliové vakuové zkoušky s nezapojeným vnějším okruhem

Z výsledků je zřejmé, že míra netěsnosti soustavy po odpojení vnějšího okruhu podstatně klesla, a to na hodnotu  $2,1 \times 10^{-5}$  mbar $\times$ l/s. Tato hodnota odpovídá standardní míře netěsnosti vyráběných vysokotlakých čerpadel. Pro definování dovolené míry netěsnosti byly řízeně vytvořeny, z hlediska těsnosti, špatné kusy, u kterých byl břit těsnícího hřídelového těsnění záměrně poškozen, jak ukazují např. Obr. 9-6 a Obr. 9-7.



Obr. 9-6 Poškozené PTFE břity

Obr. 9-7 Poškozené PTFE břity

Všechny tyto kusy byly nejprve změřeny na statické zkoušce (metoda průtoku). Zobrazený vzorek č. 1 vykazoval průtok 14,5 ml/min., vzorek č. 2 vykazoval průtok 81,2 ml/min. Tyto vysokotlaké čerpadla byly namontovány na zkušební stanice dlouhodobé zkušební firmy Bosch. Čerpadla běžely v případě vzorku č. 1 20 hodin, u vzorku č. 2 22 hodin při konst. rychlosti 2700 ot./min. Do odvětrávacích kanálek, sloužících k vyrovnávání tlaků mezi jednotlivými těsnícími kroužky (vnější a vnitřní) byly umístěny hadičky, které odebíraly do sběrné misky uniklou kapalinu. Celý prostor byl nastříkán kontrastním sprejem pro zřetelnou identifikaci uniklé kapaliny. Namontovaná čerpadla lze vidět na Obr. 9-8 a Obr. 9-9.



Obr. 9-8 Čerpadlo namontované na zkušební stanici dlouhodobé zkušebny



Obr. 9-9 Čerpadlo namontované na zkušební stanici dlouhodobé zkušebny

U těchto obou pump se prokázalo, že během dynamického zatěžování, i s těmito velmi poškozenými vnějšími těsnícími hřídelovými těsněními, jsou čerpadla těsná. Pumpovací efekt systému HELIX je tak velký, že dokáže svou funkcí eliminovat i tak velká poškození, jako byly pro tyto zkoušky vytvořeny a jsou výše zobrazeny. Pro zvýšení jistoty je však nezbytné vzorky podrobit dalšímu testování v rámci dynamických zátěžových zkoušek. První zjištěné výsledky však naznačily, že tato metoda je v této oblasti použitelná, nicméně však vzhledem ke své citlivosti ne příliš vhodná.

Výsledky metody využívající průtok zkušebního média vykazovaly velmi nízké hodnoty (blízké nule); bylo proto rozhodnuto definovat novou metodiku pro měření těchto těsnících kroužků, oproti metodě využívané u čerpadel CP3. Jedná se metodu využívající tlakového spádu. Tato metoda byla zvažována i jako možnost pro detekci míry netěsnosti u vnitřního okruhu. Z tohoto důvodu byly započaty první experimentální testy využívající metodiku tlakového spádu pro určení míry netěsnosti obou okruhů. Vývoj této metodiky ve firmě Bosch diesel, s.r.o. stále pokračuje.

## ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá vlastnostmi a využitím vzduchu, jakožto měřicího média při detekci a ověřování míry netěsnosti měřené soustavy. V teoretické části se zabývá obecným rozdělením a významem tlaku. Práce představuje samotný pojem míry netěsnosti, co znamená a s jakými nejvýznamnějšími negativními vlivy na její přesné určení se lze setkat. Práce líčí způsoby, jakými lze určit míru netěsnosti popisuje současné nejběžněji využívané metody, které se v průmyslu používají pro měření míry netěsnosti. V práci je také krátce představen měřicí přístroj, jež bude v rámci pokračujícího projektu firmy využit a částečně byl využit i během experimentální části bakalářské práce. Práce zevrubně představuje vysokotlaké čerpadlo CPN5, na kterém je celý projekt realizován a popisuje obě dvě možnosti hřídelových těsnění, jejichž výměna byla požadována ze strany zákazníka a jako dílčí úkol byla řešena v experimentální části. Závěr teoretické části se věnuje současné problematice měření míry netěsnosti ve výrobní oblasti vysokotlakých čerpadel CPN5.

V experimentální části se práce věnuje metodě měření netěsnosti PTFE těsnění. Z výsledků průtokového měření vyplynulo, že hřídelové těsnění vykazuje u čerpadel CPN5 menší míru netěsnosti, než u obdobného hřídelového těsnění stejného dodavatele, jež bylo využito u vysokotlakých čerpadel CP3. Vybrané kusy byly podrobeny heliové vakuové zkoušce. Z výsledků je patrné, že čerpadlo se zapojeným vnějším okruhem (vnější těsnicí kroužek) vykazuje vyšší míru netěsnosti, než je dovolená hranice. V případě zapojení čerpadla pouze s vnitřním okruhem klesla míra netěsnosti pod stanovenou mez. Pomocí těchto měření byla stanovena reálná mez míry netěsnosti a také nemožnost měřit tyto těsnicí kroužky pomocí heliové zkoušky.

V další části bylo vytvořeno simulované poškození břitů hřídelových těsnění za účelem stanovení dovolené míry netěsnosti ve statickém stavu, při dynamické těsnosti. Poškozené čerpadlo bylo namontováno a uvedeno do provozu na zkušební stanici dlouhodobé zkušebny. Z výsledků je patrné, že i přes značné poškození těsnících břitů, vykazují těsnění při dynamickém zatěžování vysokou míru těsnosti. Pumpovací efekt u těchto PTFE těsnění je pravděpodobně tak veliký, že eliminuje i takto velká poškození. Tato skutečnost je však dále ověřována dalšími testy a samotný projekt u firmy Bosch Diesel, s.r.o i nadále probíhá.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] *MĚŘENÍ TLAKU* [online]. [vid. 21. červen 2014]. Dostupné z: [http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/mmv/tlak/ramce\\_tlak.htm](http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/mmv/tlak/ramce_tlak.htm)
- [2] JAHNS, Jan. *Fyzika*. 1. vyd. Praha: Účelová edice Svazu českých potápěčů, 2008, 120 s.
- [3] PIŠKULA, František; ŠTĚTINA, Jan; PIŠKULA, Michal. *Sportovní potápění*. 1. vyd. Praha: Naše vojsko-Svazarm, 1985, 358 s.
- [4] Interní materiál firmy Bosch Diesel s.r.o. - BABICKÝ, Václav. Prezentace *Principy vzduchového měření*, vytvořeno 5.12.2012
- [5] *STOTZ Feinmesstechnik GmbH* [online]. [vid. 21. červen 2014]. Dostupné z: <http://www.stotz.com/uns.php?PHPSESSID=76687d1kd3ljfmdtclbppkban2>
- [6] Interní materiál firmy Bosch Diesel s.r.o. - JhP/TEF1. Prezentace *Backstage*, vytvořeno 1.11.2011
- [7] *Leckraten, Prüfmethoden, Sensoren, Lecktester* [online]. [vid. 21. červen 2014]. Dostupné z: <http://www.maceas.com/dichtheitspruefung.html?gclid=COOE-X7370CFQnpwgodtJsAdQ>
- [8] Interní materiál firmy Bosch Diesel s.r.o. - ZAVADIL, Miloš. Prezentace *Metody detekce netěsnosti*, 5.10.2012
- [9] Interní materiál firmy Bosch Diesel s.r.o. - ATEQ, firma. Katalog *Testování těsnosti*, vytvořeno 11.4.2014
- [10] *Index of /download/pneumaticka-mereni/mereni-poklesu-tlaku* [online]. [vid. 19. červen 2014]. Dostupné z: <http://www.ateq.cz/download/pneumaticka-mereni/mereni-poklesu-tlaku/>
- [11] *F5200 Leak Tester | Ateq Leaktesting* [online]. [vid. 21. červen 2014]. Dostupné z: [http://www.ateq-leaktesting.com/productservices/product/f5200\\_leak\\_tester?page=1](http://www.ateq-leaktesting.com/productservices/product/f5200_leak_tester?page=1)
- [12] Interní materiál firmy Bosch Diesel s.r.o. - GRUNDĚL, Jan. Prezentace *Školení produktu CPN5*, vytvořeno 3.11.2011
- [13] Interní materiál firmy Bosch Diesel s.r.o. - KACO. Katalog firmy *Wellendichtringe*, vytvořeno 2011
- [14] Interní materiál firmy Bosch Diesel s.r.o. - BRUSS. Katalog firmy *Dynamische Wellendichtringsysteme*, vytvořeno 2012
- [15] *Klasifikace (typy) testovacích metod podle normy EN 1779* [online]. [vid. 30. červen 2014]. Dostupné z: <http://www.detekce-netesnosti.cz/klasifikace-typy-testovacich-metod-podle-normy-en-1779/>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

dF	[N]	-	element síly F
dS	[m <sup>2</sup> ]	-	element plochy S
F	[N]	-	síla
g	[m.s <sup>-2</sup> ]	-	tíhové zrychlení
h	[m]	-	hloubka
m	[kg]	-	hmotnost
m <sub>C</sub>	[kg]	-	celkové množství plynu v měřené soustavě
m <sub>L</sub>	[kg]	-	množství uniklého plynu během měření
m <sub>M</sub>	[kg]	-	množství plynu v měřené soustavě po měření
p	[Pa]	-	tlak
p <sub>a0</sub>	[Pa]	-	atmosférický tlak při hladině moře
p <sub>abs</sub>	[Pa]	-	absolutní tlak
p <sub>b</sub>	[Pa]	-	barometrický tlak
p <sub>c</sub>	[Pa]	-	celkový tlak
p <sub>d</sub>	[Pa]	-	dynamický tlak
p <sub>s</sub>	[Pa]	-	statický tlak
Q <sub>L</sub>	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	-	míra netěsnosti kapalin
R	[J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	-	molární plynová konstanta
S	[m <sup>2</sup> ]	-	plocha
T	[K]	-	teplota
V	[m <sup>3</sup> ]	-	objem
V <sub>h</sub>	[m <sup>3</sup> ]	-	objem sloupce vody
Δp	[Pa]	-	rozdíl tlaku
Δt	[s]	-	změna času
ΔV	[m <sup>3</sup> ]	-	změna objemu
ρ	[kg.m <sup>-3</sup> ]	-	hustota

